



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Influencia de la calidad del áridos reciclado en las propiedades del mortero

Treball realitzat per:

Carlos Andrés Vaca Coronel

Dirigit per:

Dra. Miren Etxeberria Larrañaga

Màster en:

Enginyeria Ambiental

Barcelona, 19 de Septiembre del 2016

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Agradecimientos

Primero y más importante quisiera agradecer a mi tutora de Trabajo Final de Master Miren Etxeberria por permitirme realizar este estudio experimental, por su guía y la transmisión de sus conocimientos.

De igual manera a Anna Galindo, quien estuvo pendiente de todos los trabajos que se realizaron ya sea en la fase experimental como en la teórica, sin ella no hubiera sido posible llevar a cabo esta TFM.

A mis compañeros de laboratorio Mariana y Sergio, quienes mostraron su gran calidad de trabajo y buen ambiente laboral, permitiendo que se desarrollara una buena amistad con ellos.

Al técnico de laboratorio Sergi, por su ayuda en la realización y seguimiento de los ensayos realizados.

A mi familia en Ecuador y a mi nueva familia en Barcelona J.H.H.M.C., quienes siempre me apoyaron y su ejemplo de superación.

Carlos

Resumen

TÍTULO Influencia de la calidad del árido reciclado en las propiedades del mortero.

AUTOR Carlos Vaca Coronel

TUTORA Miren Etxeberria Larrañaga

En la actualidad, la sostenibilidad juega un papel importante en todos los ámbitos de la industria. Dentro del sector industrial, la construcción ha ido creciendo de manera sostenida por lo que desde hace mucho tiempo se regula con normativas de construcción y disposición de los recursos usados, siendo uno de los puntos fundamentales la gestión de los materiales reciclados.

El crecimiento en el sector de la construcción influye directamente en el crecimiento de la generación de residuos procedentes de nuevas construcciones así como de la demolición y renovación de viejas infraestructuras. Estos residuos se denominan residuos de construcción y demolición (RCD). El medio ambiente es alterado debido al creciente volumen de RCD si no también al tratamiento de estos. Por lo que es necesario los estudios en el campo del uso de materiales reciclados.

Este Trabajo Final de Master está enfocado en la mejora de las propiedades de los áridos reciclados de tal manera que influyan en las propiedades mecánicas y de durabilidad del mortero resultante fabricado con esta tipología de material. Todo esto, con el objetivo de usarlo como material estructural y promover su utilización.

Del estudio experimental de esta tesina se observó el comportamiento de los áridos finos sometidos a tres tratamientos físicos y químicos donde se evalúe el cambio en sus propiedades y las propiedades del mortero resultante fabricado con él, sobretodo en el ámbito de la durabilidad. Además, el mortero fue fabricado en diferentes combinaciones de áridos que incluyen áridos convencionales, áridos reciclados con sustitución del 25% y 50%, áridos reciclados con tres tratamiento seleccionado con distintos niveles de sustitución. Todos estos materiales proceden de probetas de 30 MPa y 25 MPa.

Existen dos fases de fabricación, donde se añadirá cenizas volantes a la fabricación de la segunda fase pero conservando los parámetros de dosificación para una comparación en sus propiedades y durabilidad a 7, 28 y 90 días con los morteros previamente fabricados.

Los morteros se han fabricado con cemento Portland CEM II 42.5 A-L como aglomerante y se dosificara mediante el método de compactación máxima.

Las propiedades mecánicas y de durabilidad incluyen los ensayos de medición de densidad y porosidad, resistencia a la compresión, resistencia a la tensión. Todos los tratamientos de los áridos reciclados has sido ensayados en función del porcentaje de mortero adherido en los áridos reciclados, el tiempo de permanecía del tratamiento en contacto con los áridos y el uso o no de la bomba de vacío.

Abstract

TITLE Influence on the quality of recycled aggregate on the mortar properties.

AUTHOR Carlos Andrés Vaca Coronel

TUTOR Miren Etxeberria Larrañaga

At present, sustainability plays an important role in all aspects of industry. Within the industrial sector, construction has been increasing steadily and for that reason it is adjusted with building regulations and resources used. Therefore, one of the key points is the management of recycled materials.

The growth of the construction sector directly influences the increase of waste generated from new construction and demolition and renovation of old infrastructures. These residues are called construction and demolition waste (CDW). The environment is altered due to the increasing volume of CDW but also the treatment of these. Therefore this study is necessary in the field to increase the use of recycled materials.

This TFM is focused on improving the properties of recycled aggregates so that include the mechanical and durability of the resulting mortar made of this type of materials properties. All this, with the aim of using it as a structural material and promote their use.

This experimental study shows the behavior of fine aggregates subjected to three physical and chemical treatments where the change in their properties and the properties of the resulting mortar manufactured, especially in the field of assessing durability was observed. In addition, the mortar was manufactured in different combinations include conventional aggregates, recycled aggregates with substitution of 25% and 50%, recycled aggregates with three selected treatment with different levels of substitution. All these materials are from specimens of 30 MPa and 25 MPa.

There are two phases of manufacturing, where fly ash is added to the manufacturing of the second phase but keeping the dosage parameters for comparison in properties and durability to 7, 28 and 90 days with previously manufactured mortars.

Mortars are made with Portland cement CEM II A-L 42.5 as binder and is made by the method of maximum compaction.

The mechanical and durability properties include assays measuring density and porosity, compressive strength, tensile strength. All treatments of recycled aggregates have been tested according to the percentage of mortar adhered to recycled aggregates, time of treatment remained in contact with the aggregates and the use or not of the vacuum pump.

Índice de la Tesina

Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Abstract	v
Índice de la Tesina	vi
Índice de Figuras	viii
Índice de Tablas	x
Glosario	xi
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	1
1.2.1 Objetivos generales	1
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Metodología y Organización del documento	2
2 ESTADO DEL ARTE	5
2.1 Introducción	5
2.2 Tipologías de áridos	6
2.2.1 Árido Natural	6
2.2.2 Árido Reciclado	6
2.3 Morteros con áridos reciclados	12
2.3.1 Tipos de morteros.	12
2.3.2 Propiedades del mortero en estado fresco	12
2.3.3 Propiedades de los morteros en estado endurecido	15
2.4 Tratamientos de los áridos reciclados.	19
2.4.1 Tratamiento con humos de sílice (SF)	19
2.4.2 Tratamiento con Cristal o sodio silicato (WG)	22
2.4.3 Tratamiento con nano partículas de Sílice (NS)	24
2.5 Morteros con adición de cenizas volantes.	25
3 MATERIALES Y METODOLOGIA	29
3.1 Introducción	29
3.2 Caracterización de los materiales	30
3.2.1 Cemento	30
3.2.2 Cenizas Volantes	30

3.2.3	Áridos	30
3.2.4	Mortero adherido del árido reciclado.	33
3.2.5	Aditivo	33
3.2.6	Humo de sílice (SF)	34
3.2.7	Sodio Silicato o Cristal (WG)	34
3.2.8	Nano partículas de sílice (NS)	34
3.2.9	Bomba de vacío	35
3.3	Tratamientos a los áridos reciclados	35
3.3.1	Procedimiento de los tratamientos usados.	36
4	METODOLOGÍA Y ENSAYOS EN EL MORTERO	37
4.1	Introducción	37
4.2	Proceso de fabricación del mortero	37
4.2.1	Fabricación del mortero	37
4.2.2	Tipología del Mortero	38
4.2.3	Dosificación	40
4.2.4	Ensayos del mortero en estado fresco	41
4.2.5	Ensayos del mortero en estado endurecido	43
5	RESULTADOS DE LA FASE EXPERIMENTAL PARA MORTEROS CON TRATAMIENTOS EN LOS ARIDOS RECICLADOS	45
5.1	Introducción	45
5.2	Ensayos en los áridos.	45
5.3	Ensayos al mortero en estado fresco	47
5.4	Ensayos al mortero en estado endurecido	50
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
6.1	Introducción	60
6.2	Propiedades Físicas	60
6.3	Propiedades Mecánicas	60
6.4	Conclusiones generales	62
6.5	Futuras investigaciones	62
7	BIBLIOGRAFÍA	63

Índice de Figuras

Figura 1.1	Organización de la Tesina	3
Figura 2.1	Composición de los áridos reciclados gruesos	7
Figura 2.2	Áridos con mortero adherido	8
Figura 2.3	Mortero adherido según el tamaño de árido	8
Figura 2.4	Mortero adherido vs Densidad relativa aparente	9
Figura 2.5	Relación entre la densidad aparente y la absorción	10
Figura 2.6	Relación entre tamaño de los áridos y la absorción	10
Figura 2.7	Relación entre el contenido de mortero y la absorción	11
Figura 2.8	Máquina de ensayo de abrasión	11
Figura 2.9	Consistencia de Áridos incorporando áridos reciclados en diferentes proporciones	13
Figura 2.10	Densidad en estado fresco	14
Figura 2.11	Resistencia a la compresión	16
Figura 2.12	Resistencia a la flexión vs contenido de árido reciclado	16
Figura 2.13	Relación entre la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión	17
Figura 2.14	Comparativa de Adherencia vs reemplazo por árido reciclado	17
Figura 2.15	Capacidad de Absorción del mortero con reemplazo por áridos reciclados	18
Figura 2.16	Densidad de los morteros con diferentes niveles de reemplazo con áridos reciclados	19
Figura 2.17	Consistencia del Hormigón con aditivos	20
Figura 2.18	Resistencia a la compresión	20
Figura 2.19	Resistencia a la compresión	20
Figura 2.20	Resistencia a la Tensión	21
Figura 2.21	Resistencia a la compresión	23
Figura 2.22	Resistencia a la tensión	23
Figura 2.23	Resistencia a la compresión	23
Figura 2.24	Resistencia a la Compresión y Flexión en morteros con 10% de CV	27
Figura 3.1	Trituradora de Mandíbulas	31
Figura 3.2	Estado de caída del cono	32
Figura 3.3	Microestructura de partículas de Nano sílice	34
Figura 3.4	Áridos colocados en la bomba de vacío	35
Figura 3.5	Mezcla de tratamiento con SF	36
Figura 3.6	Exposición de los áridos con tratamiento	36
Figura 4.1	Amasadora para mortero	38
Figura 4.2	Molde para morteros	38
Figura 4.3	Máquina de compactación	38
Figura 4.4	Ensayo consistencia	42
Figura 4.5	Ensayo densidad mortero fresco	42
Figura 4.6	Prensa mecánica	43
Figura 5.1	Granulometría de Arena Natural y Reciclados de 0/4 mm.	45
Figura 5.2	Resistencia a la Flexión a 7 y 28 días de Curado (30 MPa)	51
Figura 5.3	Resistencia a la Flexión a 7 y 28 días de Curado (25 MPa)	52
Figura 5.4	Resistencia a la Compresión a 7 y 28 días de Curado (30 MPa)	52

Figura 5.5	Resistencia a la Compresión a 7 y 28 días de Curado (25 MPa)	53
Figura 5.6	Resistencia a la flexión a 7 y 28 días	54
Figura 5.7	Resistencia a la compresión a 7 y 28 días	55
Figura 5.8	Resistencia a la flexión a 28 días para la fase 1 y fase 2	55
Figura 5.9	Resistencia a la compresión a 28 días para la fase 1 y fase 2	56
Figura 5.10	Absorción de agua a 28 días para la fase 1 y fase 2	58
Figura 5.11	Porcentaje de poros a 28 días para la fase 1 y fase 2	59
Figura 5.12	Densidad aparente a 28 días para la fase 1 y fase 2	59

Índice de Tablas

Tabla 2.1	Propiedades y normas de los áridos naturales	6
Tabla 2.2	Composición de los áridos reciclados gruesos	7
Tabla 2.3	Densidad y absorción de agua	10
Tabla 2.4	Capacidad retención de agua	14
Tabla 2.5	Resistencia a la compresión	15
Tabla 2.6	Resistencia a la compresión	21
Tabla 2.7	Consistencia	22
Tabla 2.8	Resultados tratamientos áridos	22
Tabla 2.9	Pruebas de Resistencia a la compresión, Trabajabilidad y Absorción	24
Tabla 2.10	Nivel de dosificación de las CV	26
Tabla 2.11	Ensayos de Permeación	26
Tabla 2.12	Resistencia a la compresión en morteros con y sin CV a 28 d	27
Tabla 2.13	Resistencia a la Flexión	27
Tabla 2.14	Resistencia a la compresión de hormigones	28
Tabla 2.15	Resistencia a la Flexión de Hormigones	29
Tabla 3.1	Componentes y Características del cemento	30
Tabla 3.2	Composición del Cemento	30
Tabla 3.3	Composición de las Cenizas Volantes	30
Tabla 3.4	Composición del humo de sílice	34
Tabla 3.5	Composición del Cristal	34
Tabla 3.6	Característica del Nano sílice	34
Tabla 3.7	Dosificación para los tratamientos con áridos reciclados	35
Tabla 4.1	Tipología de Mortero Fabricado para la fase 1	38
Tabla 4.2	Tipología de Mortero Fabricado para la fase 2	39
Tabla 4.3	Dosificación de Mortero Fabricado para la fase 1	40
Tabla 4.4	Dosificación de Mortero fabricado para la fase 2	41
Tabla 4.5	Clasificación de los morteros según su consistencia	42
Tabla 5.1	Resultados tratamiento térmico	46
Tabla 5.2	Propiedades de los áridos	46
Tabla 5.3	Propiedades de los áridos con tratamientos	47
Tabla 5.4	Consistencia de morteros primera fase	47
Tabla 5.5	Consistencia de morteros segunda fase	48
Tabla 5.6	Densidad en estado fresco morteros primera fase de fabricación	49
Tabla 5.7	Densidad en estado fresco segunda fase de fabricación	49
Tabla 5.8	Flexión y Compresión a los 7 y 28 días de curado de la fase 1	50
Tabla 5.9	Flexión y Compresión a los 7 y 28 días de curado de la fase 2	53
Tabla 5.10	Densidad y Porosidad de los morteros con áridos reciclados de la fase 1	57
Tabla 5.11	Densidad y Porosidad de los morteros con áridos reciclados de la fase 2	58

Glosario

RCD/CDW	Residuos procedentes de la construcción y de la demolición
MC	Mortero convencional
MCC	Mortero convencional con 30 % de cenizas volantes
P	Cemento Portland CEM II, 42.5 A - L
CV	Cenizas volantes
w/c	Relación agua/cemento
SF	Humo sílice
WG	Cristal o Sodio silicato
NS	Nano partículas de Sílice
ITZ	Zona de transición, interfase
UPV	Ensayo Ultrasonic Pulse Velocity
MR A-B-C	Mortero con áridos reciclado, A: procedencia del árido reciclado de hormigón, B: porcentaje de sustitución, C: tratamiento aplicado
MRC A-B-C	Mortero con áridos reciclado y cenizas volantes, A: procedencia del árido reciclado de hormigón, B: porcentaje de sustitución, C: tratamiento aplicado

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La sostenibilidad en el uso de los áridos reciclados se apoya los 3 pilares de su fundamento, ambiental, social y económico, ya que disminuye el volumen en los vertederos, disminuyendo la explotación de los recursos naturales y disminución en los costes. Este último punto depende de varios factores como la localización de la fuente de áridos naturales y el acceso a equipos para la transformación de escombros en material útil.

De los beneficios adicionales de estos trabajos se encuentra. Primero, la reducción de recursos naturales no renovables. Segundo, la disminución de impacto ambiental debido a la reducción del producto enviado al vertedero, siendo en la actualidad el 75% del volumen total de los residuos de demolición y renovación, disminuyendo el impacto natural que estos producen en el medio ambiente. Esto permitirá disminuir las inversiones en nuevos vertederos. Tercero, la disminución de emisiones de CO₂ por transporte de material. Esto es debido a que se disminuye el transporte desde la empresa que suministra los áridos naturales hasta en punto de estudio. Además, minimiza el transporte desde el lugar de la demolición hacia los vertederos.

El desarrollo de este trabajo de Master está encaminado a mejorar las capacidades del mortero reciclado, alcanzando las propiedades necesarias, que permitirían su uso aumentando el porcentaje de reemplazo el cual según la norma EHE está permitido solo un 20%.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos generales

Como objetivo principal de esta Tesis de Máster es la verificación de los cambios físicos en la estructura interna mediante diferentes tipologías de tratamientos en los áridos finos reciclados, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de los morteros fabricados con la arena reciclada haciéndolos más competitivos respecto al mortero convencional.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Caracterización de los áridos finos naturales y reciclados; determinar sus propiedades físicas.
2. Determinar qué tipos de tratamientos y dosificaciones son adecuados para la mejora de los arena reciclados modificando sus propiedades. Ver que propiedades han sido modificadas. Una vez se ha determinado los tratamientos y dosificaciones adecuadas se procede a fabricar el mortero. Para poder realizar el estudio completo se fabricará mortero convencional, mortero reciclado sin y con tratamientos, con distintos niveles de sustitución.
3. Verificar las modificaciones en las propiedades de los morteros reemplazando, de las morteros previamente seleccionados para su fabricación, 30 % de cemento por cenizas volantes.
4. Determinar las propiedades de los morteros fabricados ya sean propiedades físicas y mecánicas (7, 28 y 90 días), y de durabilidad (28 y 90 días)
5. Verificar si mediante los tratamientos de los áridos fino reciclados el mortero resultante adquiere unas propiedades y prestaciones similares al mortero convencional, haciendo más competitivo el mortero reciclado.

1.3 Metodología y Organización del documento

La organización de este documento de trabajo de master está ilustrado en la **figura 1.1**, donde de forma esquemática se muestra como se ha llevado el trabajo de estudio planteado en los objetivos expuestos anteriormente.

El documento está formado por capítulos donde se describirán un breve detalle de cada uno de ellos a continuación.

En el **Capítulo 1** se detalla los motivos del estudio, los objetivos y la forma como se desarrollara este trabajo de Master

En el **Capítulo 2**, se describen de forma ordenada los trabajos o estudios anteriores que ayudaran a sustentar esta línea de investigación, mediante un estado del arte. Incluye datos de otros autores, metodologías usadas y propiedades estudiadas en relación al árido reciclado y sus tratamientos para la modificación de sus propiedades.

En el **Capítulo 3**, se describe la metodología usada y los procedimientos seguidos según las normativas exigidas.

En el **Capítulo 4** se describe la fase experimental que se ha realizado y los materiales usados. Además, de su caracterización en el laboratorio.

En el **Capítulo 5** se muestran los resultados obtenidas de la fase experimental. Se incluye un análisis de los resultados para cada ensayo con sus variables estudiadas.

Al final en el **Capítulo 6**, se muestran las conclusiones obtenidos de los resultados dando respuesta a los objetivos planteados y se plantean futuras líneas de investigación para continuar con el estudio de este documento.

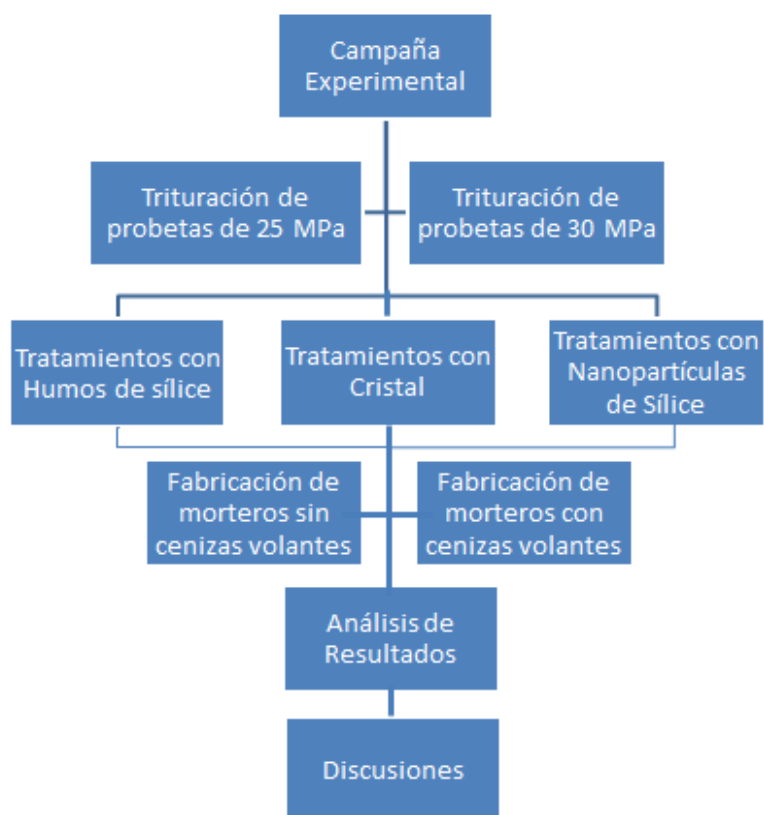


Figura 1.1 Organización de la Tesina

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

Actualmente la tendencia de la sociedad es la construcción de nueva infraestructura cada vez más alejada de los centros urbanos movilizándolo a la industria hasta los límites urbanos de las sociedades en caso de existir yacimientos o mucho más lejos. Estos lugares en medio de la sociedad cuentan con edificios nuevos y viejos los cuales tienen que ser demolidos o remodelados. El difícil acceso a estos lugares ha creado un nuevo nicho de mercado para las opciones entre material natural o reciclado.

“Los residuos de construcción y demolición (RCD) constituyen uno de los flujos de residuos más importantes de Europa, por su elevada tasa de producción per cápita y por la viabilidad técnica y económica de su reciclaje. Por esta razón, la Comisión Europea los declaró “flujo de residuos prioritario” en su política medioambiental de 1996.” Asociación española de gestores de residuos de construcción y demolición, 2011 [1]. La regulación de la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición está dada por el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero y por la Resolución de 20 de enero de 2009.

Según datos elaborados por la asociación GERD [1]. obtenidos de la “Estadística anual de precios y tarifas del sector”, la producción de RCD el año 2008 fue estimada en unos 35 millones de toneladas. Aproximadamente un 15% de estos residuos fueron reciclados y transformados en materiales secundarios para la construcción, bien como árido reciclado o como material inerte para ser utilizado de relleno y para restauración.

Anualmente los RCD se en Europa, USA y Japón está estimado en 900 millones de toneladas, [2]. Para la contribuir a la mejora de los flujos de RCD, se estudia el aumento de la tasa de reemplazo de áridos mediante tratamientos físicos y químicos los cuales serán evaluados en la fabricación de probetas de un solo tratamiento. Aunque la cantidad de material reciclado está ligado a normativas de uso de local, España con sus normas EHE, el cual permite bajo ciertos parámetros el reemplazo de hasta el 20 % de áridos naturales. Este valor no debe quedar estático, es por lo que al igual que otros trabajos que buscaban estudiar el aumento del uso de áridos reciclados como Hanouns 2008 [3] o Gesoglu et al. 2015 [4], pero se adicionará tratamientos físico y químicos para mejorar sus propiedades y durabilidad.

2.2 Tipologías de áridos

La tipología del árido depende de su procedencia, por lo que se los clasifica como áridos naturales, procedentes de la extracción de los áridos en yacimientos naturales, y la otra tipología corresponden a áridos reciclados, aquellos que provienen de los residuos de la construcción y de la demolición de estructuras de hormigón u otros materiales de la construcción.

2.2.1 Árido Natural

El árido natural calizo procedentes de canteras, cuyas propiedades están estandarizadas en la norma europea EHE, y listadas en la **tabla 2.1** Estos procedimientos están de acuerdo a las normas ASTM

Tabla 2.1 Propiedades y normas de los áridos naturales [1]

Propiedades	Norma
Granulometría	UNE EN 12620
Densidad y absorción de agua	UNE EN 12620

2.2.2 Árido Reciclado

Los RCD tiene una composición heterogénea, debido a su origen, la variación por su procedencia es debido a que es recolectado de diversas situaciones, como remanentes de construcción de obra nueva o vías de comunicación o por productos de demolición y reconstrucción.

Existen diferentes tipologías de áridos reciclados , dependiendo del porcentaje de sus componentes estos son:

- Árido reciclado cerámico: El material predominante es el cerámico cuyas características principales son su porosidad y densidad, por esto, la norma holandesa permite su uso para densidades secas superiores a 1600 kg/m³.

- Áridos reciclados mixtos: Es un árido con porcentaje de hormigón mayor al 50 % y densidad seca superior a 2100 kg/m³ , además , no puede contener más del 50% de material pétreo reciclado de distinta naturaleza que el hormigón.

- Áridos reciclados de hormigón: Es un árido resultante de la transformación del hormigón después de los procesos de machacado y cribado. Debido a su forma de obtención está compuesto en mayor porcentaje por áridos naturales y mortero adherido, existen otros elementos en menor cantidad, provenientes a la contaminación o mezcla en el lugar de origen.

En esta sección se estudiara al árido reciclado finos de hormigón que según algunos estudios Etxeberria et al 2007 [5], se puede ver la composición de los áridos reciclados en la **tabla 2.2** y **figura 2.1** que se encuentran a continuación.

Tabla 2.2 Composición de los áridos reciclados gruesos [5]

Componentes	Porcentaje (%)
Cerámicos	29
Hormigón y áridos	60
Asfalto	9
Impurezas	2

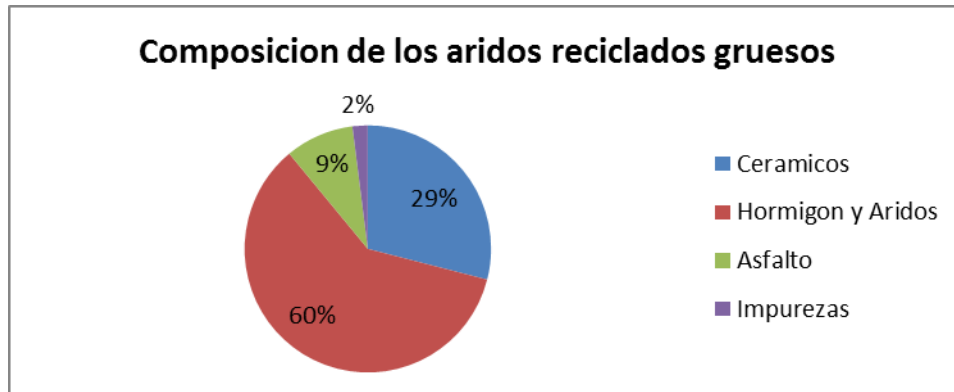


Figura 2.1 Composición de los áridos reciclados gruesos [5]

2.2.2 Propiedades del Árido Reciclado

De acuerdo con Etxeberria et al 2007 [5], el hormigón reciclado al igual que el hormigón convencional puede ser usado de la misma manera, en casos de fabricación, preparado y curado de la mezcla.

Algunos estudios Sánchez de Juan 2004 [6], establecieron los límites de los áridos reciclado para que al ser usado en la fabricación de hormigón, este conserve similares características que los hormigones convencionales. Este árido reciclado también llamado árido reciclado de buena calidad tiene las siguientes características que debe mantener:

- Áridos con contenido de mortero menor al 44 %,
- Densidad específica aparente mayor a 2160 kg/m³,
- Absorción de agua menor al 8 %, y
- Prueba de abrasión de los Ángeles menor al 40 % (LA₄₀),

La calidad puede ser producida controlando la resistencia del hormigón original , sobre los 25 N/mm²

Composición granulométrica.

La distribución de tamaño puede variar según la tecnología de machacado y la resistencia del hormigón escogido, por lo que hay que tener en cuenta el cumplimiento de las normativas de distribución por tamaño de árido (1) .

Mortero adherido

El mortero adherido en los RCA es lo que diferencia a los áridos reciclados de los áridos naturales. La composición heterogénea del hormigón influye en la cantidad de mortero adherido, esta variabilidad disminuye al seleccionar materiales con resistencias similares. La cantidad de mortero adherido condicionara a las propiedades del mortero fabricado con esta tipología de áridos, como lo afirma Juan & Gutiérrez 2009 [7], por lo que será necesario determinar la cantidad de mortero adherido existente para el cálculo de la cantidad de tratamiento a usar.

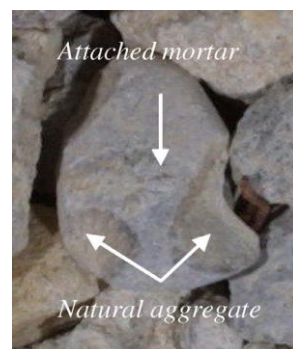


Figura 2.2 Áridos con mortero adherido [7]

Para determinar la cantidad de mortero adherido no existe un método estándar establecido pero existen varios métodos, aunque con resultados diferentes.

- **Método 1.-** Tratamiento con una solución de ácido clorhídrico Hasen TC 1992 [8]: consiste en una áridos reciclados inmersa en una solución de ácido clorhídrico.
- **Método 2.-** Fabricación de nuevo concreto Hasen TC 1992 [8] o Ravindrarajah RS [9]: Consiste en la fabricación de nuevo hormigón hecho con áridos reciclados y nuevo cemento de color, por lo que la superficie del mortero es fácilmente detectada diferenciando ambos colores.
- **Método 3.-** Tratamiento térmico Oliveira 1996 [10] o Vázquez [11]: Consiste en varios ciclos de remojo en agua y calentamiento del árido, donde a temperaturas mayores a 400°C el hidróxido de calcio es deshidratado causando una desintegración del mortero adherido Etxeberria et al 2007 [5].

Los resultados obtenidos de investigaciones previas Sánchez de Juan 2004 [6] varían según el método escogido, por lo que para el tratamiento por ácido hipoclorhídrico da entre (25–70%), para la fabricación de nuevo hormigón está entre (25–65%) y para tratamiento térmico se obtiene entre (40– 55%).

Adicional a la variación según el tratamiento de extracción del mortero adherido, el tamaño del árido también es un factor que se ha estudiado Sánchez de Juan 2004 [6], mostrados en la **figura 2.3**.

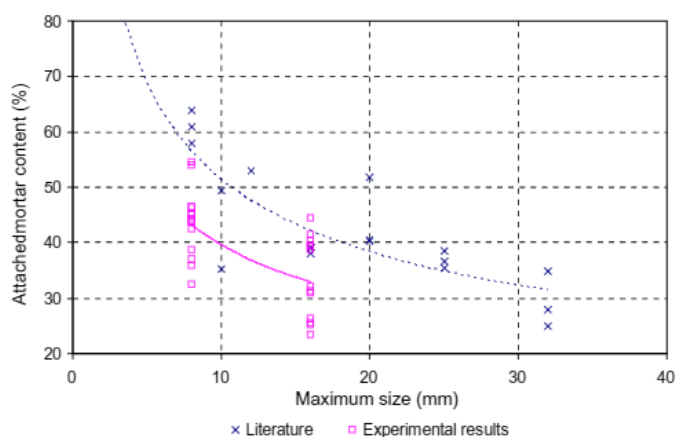


Figura 2.3 Mortero adherido según el tamaño de árido [6]

Densidad

La densidad es una de las propiedades físicas del RCD que varía respecto al árido natural. EL árido natural tiene una densidad media de 2400 kg/m^3 , mientras que el RCD tiene una densidad media de 2250 kg/m^3 . Según estudios Rahal 2007 [12] la reducción media es entre 5 – 15 %. Esto se debe a que el RCD está compuesto por áridos naturales y mortero adherido, siendo este último de menor densidad que el árido natural.

En la **Figura 2.4** siguiente se muestra la relación entre el mortero adherido y la densidad del árido reciclado, donde se evidencia una disminución de la densidad a mayor contenido de mortero adherido.

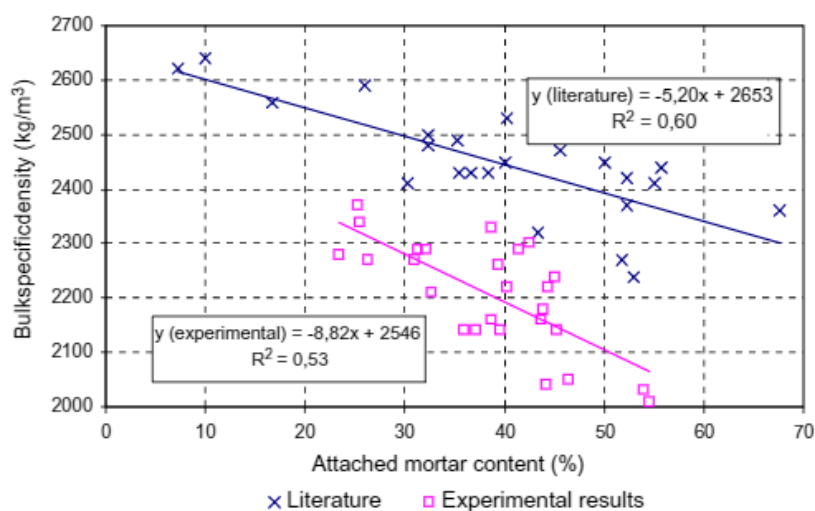


Figura 2.4 Mortero adherido vs Densidad relativa aparente (6)

Absorción

La absorción es la propiedad que mide la cantidad de agua que puede retener un material y está directamente ligada al material, al tamaño del árido y al mortero adherido por lo que áridos de diferente procedencia presentaran valores distintos de absorción.

Los áridos naturales presentan valores de absorción entre 0-4% mientras que los áridos reciclados presentan un cambio en su capacidad de absorción alcanzando valores entre 16-17% para los áridos cerámicos y entre 7-12% para los áridos de hormigón Etxeberria et al 2007 [5]. Otro estudio llevado por **L. Butler et al 2011** [13], muestra la diferencia entre las capacidades de absorción del árido natural y el árido reciclado de demolición, en valores de 2.6 y 3.7 veces.

Pruebas realizadas en diferentes estudios como el de Z. Shui et al [14], L. Evangelista et al [15] o P. Saiz Martínez et al. [16] se analiza los resultados obtenidos para diferentes áridos reciclados en la **Tabla 2.3**:

Tabla 2.3 Densidad y absorción de agua

Prueba	AR [14]	AR [15]	AR [16]	AR [16]	AR [16]	ARIDO NATURAL
Densidad seca	2080	2000	2130	2130	2100	2650
Absorción Agua	11,1%	10,43%	7,48%	6,88%	6,12%	0,82%

Otros estudios como Sánchez de Juan 2004 [6] encontraron que el árido reciclado tenía mayor capacidad de absorción de agua que el árido natural, esto se lo observa en la **figura 2.5** donde se evidencia mayor absorción de agua a menor densidad relativa aparente.

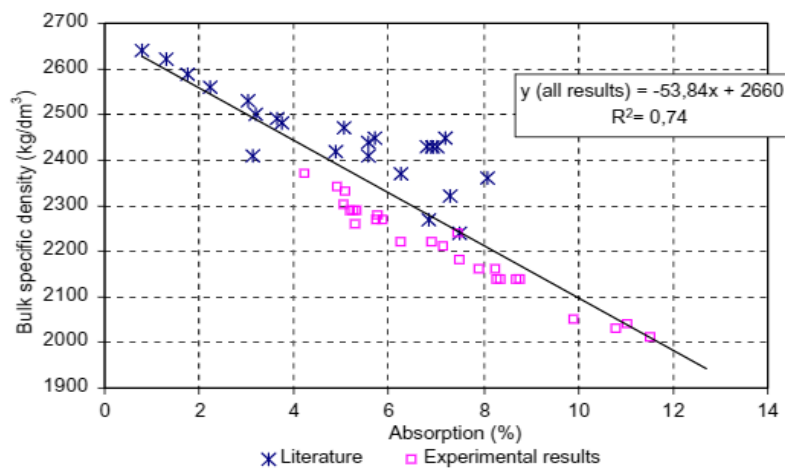


Figura 2.5 Relación entre la densidad aparente y la absorción [6]

Según el tamaño de los áridos, también existe una relación que establece una mayor absorción a menor tamaño de áridos, esto de acuerdo al grafico presentado en la **figura 2.6**

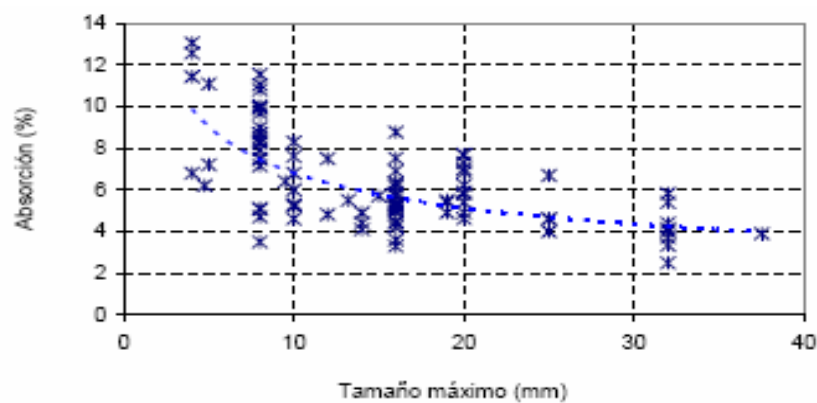


Figura 2.6 Relación entre tamaño de los áridos y la absorción [6]

Según el mortero adherido, existe una relación en la **figura 2.7** donde se observa que una mayor absorción de agua a mayor cantidad de mortero adherido .

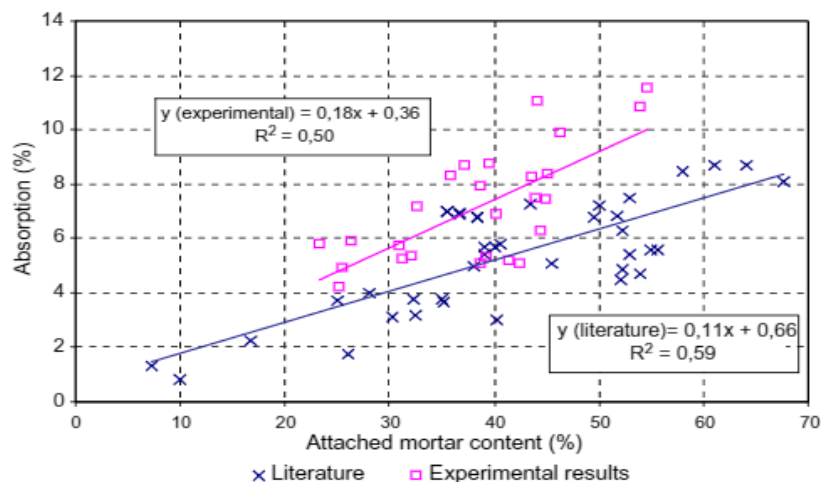


Figura 2.7 Relación entre el contenido de mortero y la absorción [6]

Coefficiente de desgaste de los ángeles

El coeficiente de desgaste de los ángeles es el porcentaje de material que atraviesa el tamiz 1.6 UNE, después de someterlo a una carga abrasiva o impacto en el interior de un cilindro hueco de acero junto con bolas del mismo material de tamaño según la granulometría ensayada a velocidad angular constante, entre 500 y 1000 vueltas. Por lo tanto, a mayor resistencia al desgaste del árido, menor será su coeficiente de los ángeles.

Los áridos reciclados poseen un elevado coeficiente de los ángeles, esto debido al mortero que se desprende al hacer el ensayo. La EHE establece un coeficiente máximo de 40% para su aplicación en hormigón estructural, mientras que los áridos reciclados poseen un rango de valores amplio 25-42% [17].



Figura 2.8 Máquina de ensayo de abrasión [18]

2.3 Morteros con áridos reciclados

Los morteros son una parte de la industria de la construcción, sirviendo como material ligante entre piezas, actuando como agarre y unión. Los morteros están compuestos por áridos, agua y adiciones o aditivos, según las propiedades requeridas de diseño. Existen varios tipos de morteros de los cuales están divididos en dos grandes grupos [19]:

- Morteros para albañilería diseñados:
- Morteros para albañilería prescritos:

Morteros para albañilería diseñados

Morteros cuya composición y sistema de fabricación se han elegido por el fabricante con el fin de obtener las propiedades especificadas. En esta clasificación se incluyen los autonivelantes y los morteros cola.

Morteros para albañilería prescritos

Mortero que se fabrica en unas proporciones determinadas y cuyas proporciones dependen de las de los componentes que se han declarado.

2.3.1 Tipos de morteros.

El mortero se divide en dos etapas que dependen de estado físico.

- Estado fresco
- Estado Endurecido

Estado Fresco

Es la primera etapa después del mezclado y amasado, cuya duración depende de la dosificación utilizada, las propiedades de los materiales usados y las condiciones externas como temperatura y humedad, etc.

Esta etapa se caracteriza porque la mezcla (mortero) es plástico y trabajable, después de la cual el mortero endurece y se consolida.

Estado Endurecido

La segunda etapa de la fabricación del mortero, donde este se encuentra en estado consolidado y sus propiedades son las exigidas para el cumplimiento de normativas y regulaciones.

2.3.2 Propiedades del mortero en estado fresco

Se analiza el mortero en su etapa inicial.

Relación agua/cemento

Estudio realizado por P. Saiz Martínez et al. [16], realizan morteros con cemento de tipo II y tipo IV, con relaciones w/c de 1:3 y 1:4 detallando los resultados de la densidad en estado fresco en la **figura 2.10**

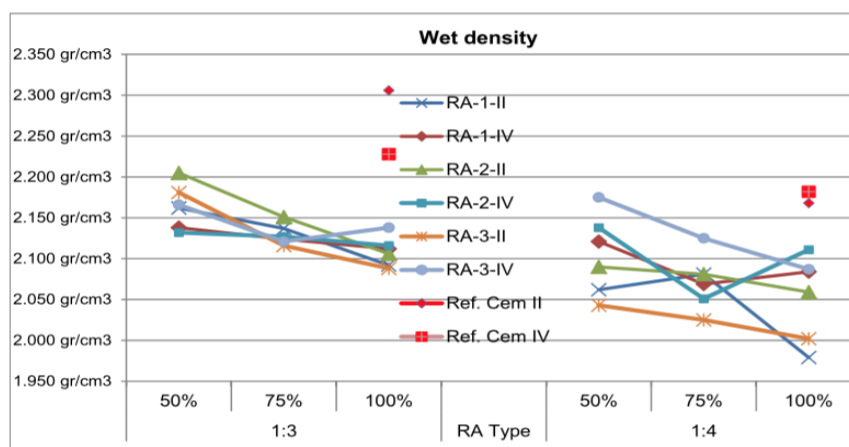


Figura 2.10 Densidad en estado fresco[16]

Se observa una tendencia general, para los dos tipos de relación w/c, obteniendo una disminución de la densidad en estado fresco a mayor porcentaje de sustitución con áridos reciclados. En los estudios de Neno et al. [21] y I. Vegas et al.[24], obtienen resultados con las mismas tendencias.

Capacidad de retención de agua

La capacidad de retención de agua influye en el grado de hidratación del conglomerante, lo que determinará el ritmo de endurecimiento del mortero. Esta directamente ligada a la trabajabilidad, la cual está relacionada con la superficie especificada de las partículas de árido fino, así como con conglomerante y, en general, con la viscosidad de la pasta.

El estudio realizado por R.V. Silva et al. [22] se realiza una recopilación de diferentes estudios realizados por otros autores, se muestra en la **tabla 2.4** una recopilación de la retención de agua para los morteros con árido reciclado:

Tabla 2.4 Capacidad retención de agua [22]

Autor	Mortero	Retención Agua (%)
Braga et al.[25]	Convencional	63,81
	15% AR	79,59
Hanzic et al. [26]	Convencional	68,00
	100% AR	74,00
Neno et al.[21]	Convencional	63,81
	20% AR	89,26

Como se puede observar en la **tabla 2.4** la capacidad de retención de agua del mortero aumenta con la sustitución del árido natural.

Contenido de aire

El contenido de aire es la propiedad del que influye tanto en la resistencia mecánica como en la durabilidad. El contenido de aire está ligado a la porosidad del material. El aumento de porosidad ayuda a la comunicación que se genera con agentes externos, agua o aire, la cual puede traer agentes dañinos para el material afectando su resistencia. El contenido de aire influye en la densidad en estado fresco y endurecido.

Existen estudios como J. Hwang et al 2007 [27] donde los resultados sugieren una reducción del contenido de aire debido al incremento de áridos reciclados, mientras que otros estudios como J.R. Jiménez et al 2013 [28] donde el contenido de aire permanece constante sin importar el nivel de reemplazo con áridos reciclados.

2.3.3 Propiedades de los morteros en estado endurecido

Después de pasar la etapa de mortero fresco, este pasa por un periodo de curado. El mortero va adquiriendo la resistencia de diseño prescrita por lo cual hay que tener cuidado con la forma de curado y los agentes externos que puedan obstruir con sus propiedades.

Las propiedades mecánicas más importantes son la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión.

Resistencia a la Compresión

La resistencia a la compresión ha sido estudiada por Z. Zhao et al.[29], variando la saturación antes de la fabricación mostrando sus valores en la **tabla 2.5** a continuación mostrada.

Tabla 1.5 Resistencia a la compresión [29]

	CM-0.50-S	CM-0.50-D	RM-0.50-S	RM-0.50-D	RM-0.55-S	RM-0.55-D	RM-0.60-S	RM-0.6-D
Fresh density (g/cm ³)	2.40	2.36	2.15	2.14	2.16	2.13	2.16	2.12
28 days saturated density (g/cm ³)	2.40	2.38	2.15	2.15	2.18	2.15	2.17	2.13
Flexural strength (MPa)	11.97	12.15	8.76	8.78	8.10	8.15	7.72	7.80
Compressive strength (MPa)	66.75	72.00	45.22	49.84	43.01	45.34	41.96	43.76

Los resultados de la **tabla 2.5** indican que los morteros fabricados con aridos sin saturar obtiene una mayor resistencia que los aridos saturados, para diferente relaciones de w/c.

En el mismo estudio [29] se determina la relación de la resistencia a la compresión para diferentes porcentajes de reemplazo con áridos reciclados expuestos en la **figura 2.11**

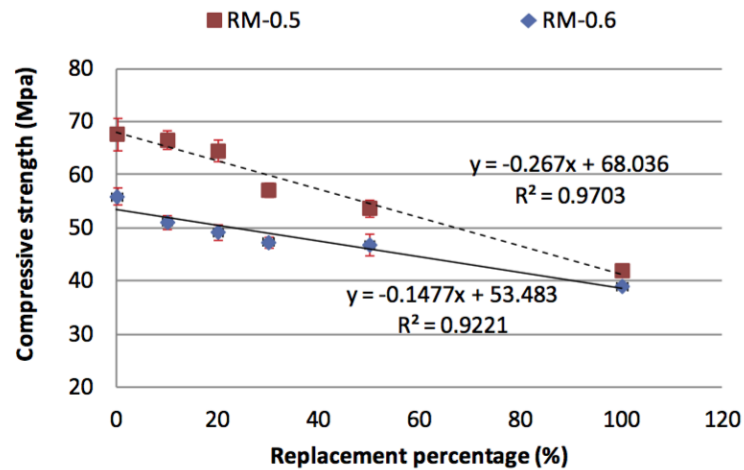


Figura 2.11 Resistencia a la compresión [29]

De la **figura 2.11** se observa como las distintas relaciones de w/c mantienen una tendencia a disminuir su resistencia a mayor reemplazo con áridos reciclados.

Resistencia a la Flexión

Estudios de R.V. Silva et al. [22] acumularon varios estudios acerca de las modificaciones de la resistencia a la flexión obteniendo los mismos efectos observados en la resistencia a la compresión, esto es que mantiene o disminuye su resistencia a mayor contenido de árido reciclado figura 2.12, por lo que afirma que existe una correlación entre la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión, como se aprecia en la **figura 2.12**

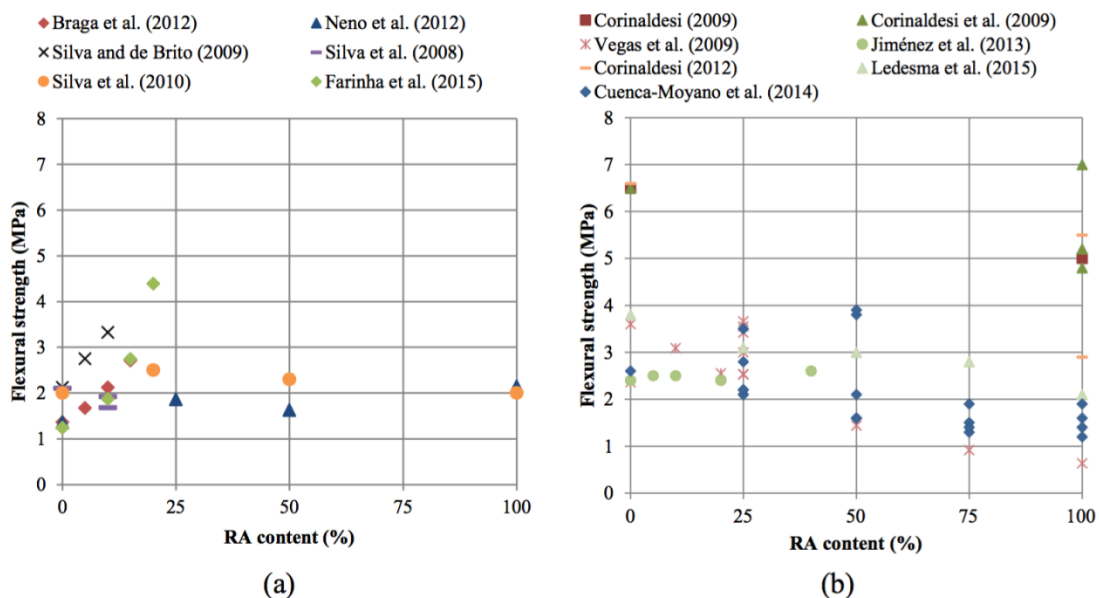


Figura 2.12 Resistencia a la flexión vs contenido de árido reciclado [22]

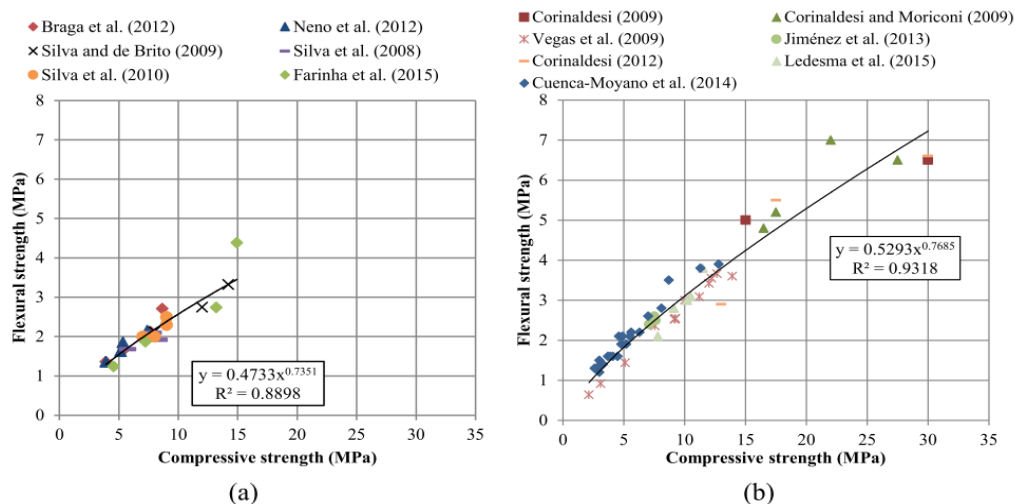


Figura 2.13 Relación entre la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión [22].

Además [22], afirma que esta propiedad está relacionada con la susceptibilidad a las fisuras y la fuerza adhesiva de los morteros.

Adherencia

La adherencia es definida por la capacidad de soportar o resistir la tracción entra la unión de un mortero y un soporte definido mediante la normativa europea UNE EN 1015-12, donde se utiliza el ensayo de arrancamiento directo perpendicular a la superficie del mortero.

La adherencia depende de tres aspectos importantes

- El mortero
- El soporte y su preparación
- La forma de aplicación

La comparación entre la adherencia y el porcentaje de reemplazo es reunido de varios estudios y analizado por R.V. Silva et al [22], mostrado en la **figura 2.14**

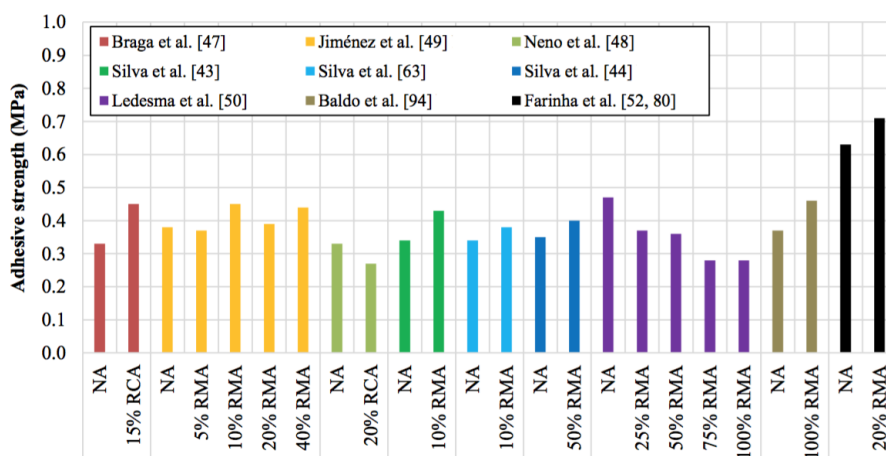


Figura 2.14 Comparativa de Adherencia vs reemplazo por árido reciclado [22]

Se observa que en la mayoría de los casos existe un incremento en la capacidad de adherencia con el uso de áridos reciclados.

Absorción de agua

La absorción de agua se determina la facilidad de absorber o drenar agua al interior del mortero, esto debido a la estructura capilar del mortero.

El uso recurrente externo del mortero permite dependiendo de su permeabilidad, el ingreso de factores externos que interfieran en la durabilidad del material disminuyendo sus características de diseño. Por lo que se relaciona el incremento de la absorción con la disminución de la durabilidad.

Estudios de R.V. Silva et al [22] reúne diferentes investigaciones sobre la medición de la absorción influenciado por el reemplazo con áridos reciclados en la **figura 2.15** siguiente.

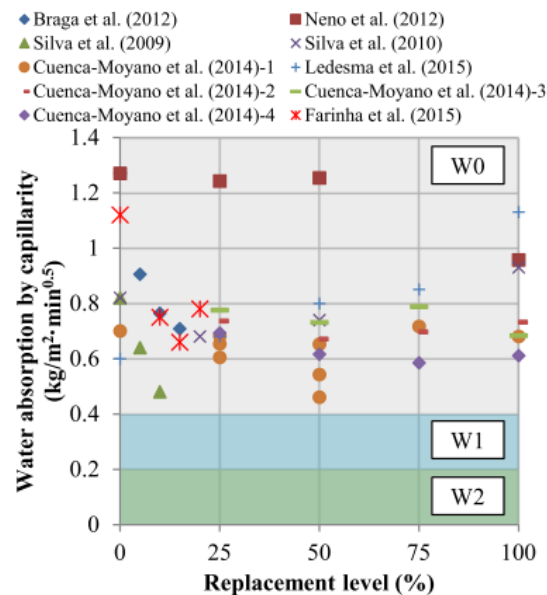


Figura 2.15 Capacidad de Absorción del mortero con reemplazo por áridos reciclados. [22]

Se observa de la figura 2.15 que la mayoría de estudios mantienen o disminuyen su capacidad de absorción con el incremento del uso de áridos reciclados.

Densidad

La densidad del mortero depende de su composición siendo sus elementos principales la arena y sus adiciones, etc., así como las propiedades de cada uno de ellos y su fabricación.

Un factor que influye en la densidad es la relación w/c, ya que a mayor relación existirá mayor agua sobrante permitiendo un aumento en la porosidad lo que impacta directamente en la densidad del mortero. Esto lo confirma R.V. Silva et al [22] reuniendo varios estudios y describiéndolos en la **figura 2.16** siguiente.

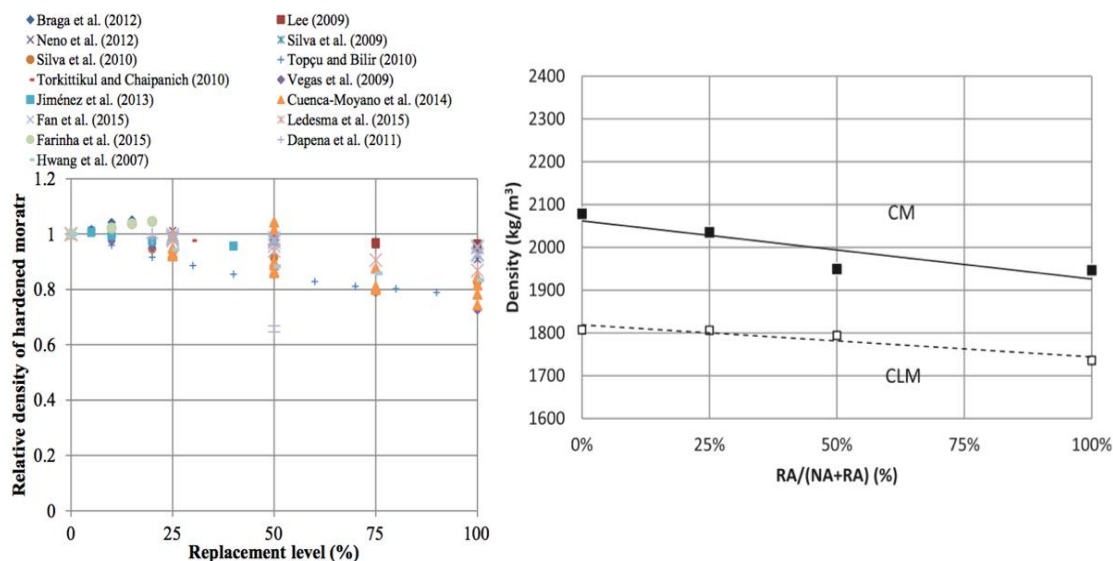


Figura 2.16 Densidad de los morteros con diferentes niveles de reemplazo con áridos reciclados [22]

La figura 2.16 muestra la tendencia general a disminuir su valor de densidad a medida que aumente el nivel de utilización de los áridos reciclados.

2.4 Tratamientos de los áridos reciclados.

Para resolver los efectos adversos en el uso de RCD para la fabricación de morteros, será necesario tomar en cuenta la composición heterogénea del hormigón que se refleja en la variación en las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad Etxeberria et al [5].

2.4.1 Tratamiento con humos de sílice (SF)

Estudios como los de Kou et al 2010 [30] se empleó el SF como reemplazo de una parte del cemento, así como otros elementos tales como cenizas volantes y escorias granuladas de altos hornos, debido a que SF pertenece a la categoría de materiales altamente puzolánica porque consiste esencialmente en sílice en forma no cristalina con una alta superficie específica posee una al área superficial (18650 cm²/g).

Los resultados obtenidos en el estudio de Kou et al 2010 [30] que se encuentran en la figura 2.17, muestran un aumento en la consistencia del mortero fresco con el uso de humo de sílice, así como con las otras mezclas realizadas en función del aumento del uso de áridos reciclados, esto es debido al agua libre utilizada para compensar la mayor absorción del árido reciclado.

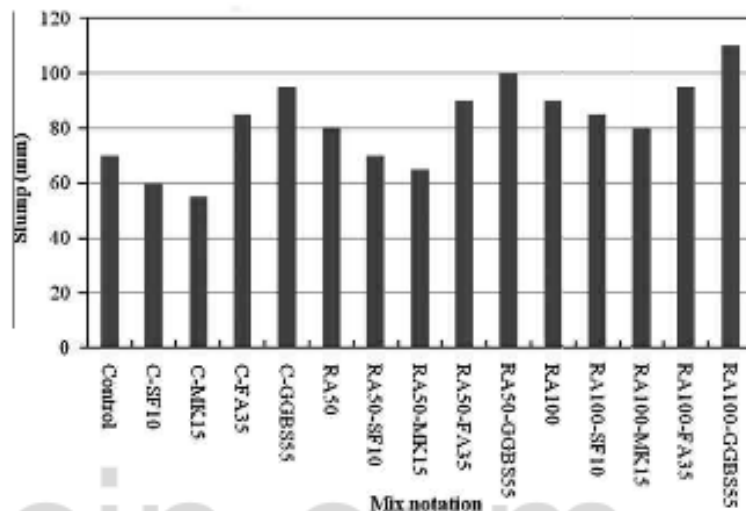


Figura 2.17 Consistencia del Hormigón con aditivos. [30]

Kou et al 2010 [30], **figura 2.18**, también observa los resultados que el curado con humo de sílice muestra mayor resistencia a la compresión que sus otros materiales, para etapas de curado hasta 90 días, en los diferentes porcentajes de reemplazo. Al igual que trabajos como los de Ö. Çakır [31], **figura 2.19**, donde analiza la resistencia a la compresión con diferentes ratios de reemplazo con árido reciclado y diferentes porcentajes de adición de SF.

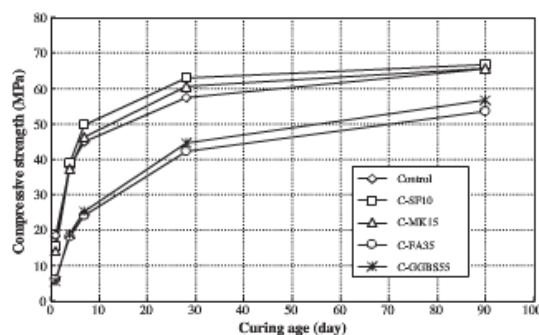


Figura 2.18 Resistencia a la compresión [30]

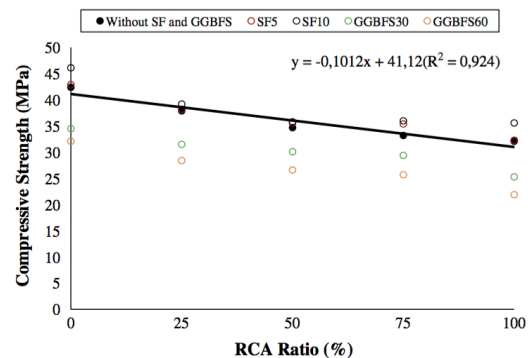


Figura 2.19 Resistencia a la compresión [31]

González-Fontebao & Martínez-Abella (2008) [32] demostraron que los hormigones fabricados con 50% de árido reciclado habiendo utilizado humo de sílice como adición obtenía resistencias superiores al hormigón convencional como al hormigón fabricado con 50% de árido reciclado y sin adiciones.

Respecto a la resistencia a la tensión Kou et al 2010 [30] muestra, en la **figura 2.20**, que la resistencia a la tensión disminuye ligeramente conforme el aumento de áridos reciclados, esa misma tendencia se muestra en las mezclas con SF aunque la resistencia es ligeramente mayor al control en cada etapa de curado.

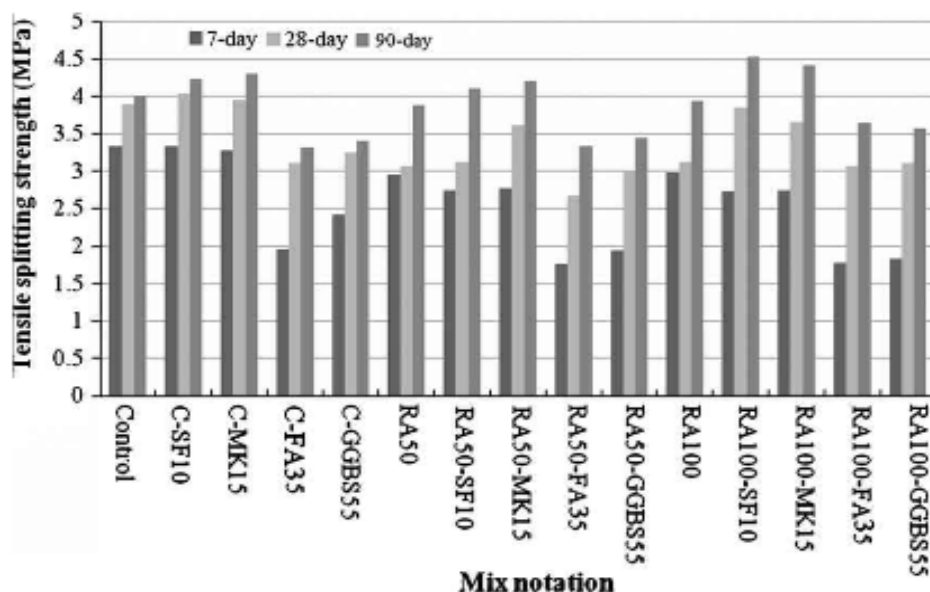


Figura 2.20 Resistencia a la Tensión [30]

De la misma manera Qing, Ye et al. 2007 [42], han aplicado humo de sílice (SF) y nano partículas de sílice (NS) y se observa en la **tabla 2.6** la mejora de los materiales a base de cemento, y han logrado observar incrementos de hasta 20 % con SF a 28 días de curado y 13 % a los 60 días, aunque sus primeras etapas de curado a 1 y 3 días no se tenía ningún incremento en sus resistencia. Mientras que la adición de NS obtiene incrementos en la resistencia desde etapas tempranas de curado 19 % a 3 días, 21 % a 28 días y 8 % a 60 días de curado. Esta diferencia entre los dos aditivos es debido a la actividad puzolánica teniendo una actividad mayor para el NS que para el SF. Esto se confirma con estudios de Mitchell et al. [33] sobre la actividad puzolánica del NS a temprana edad, informó de que el patrón de XRD de SF, puesta en hidróxido de calcio saturado (CH) solución, cambió poco hasta 7 días y extensa formación de C-S-H se había producido después de 120 días y Li et al. [34] mostró que sólo el 75% de SF se consumía en una pasta de cemento después de 90 días de curado

Tabla 2.6 Resistencia a la compresión [42]

Mix proportions, compressive and bond strengths of pastes made out of cement and NS or SF

Sample	Mix proportion in mass					Consistency ^a (mm)	Setting time			Compressive strength (MPa) (%)				Bond strength (MPa) (%)	
	C	NS	SF	W	SM		Initial	Final	Δt	1d	3d	28d	60d	7d	28d
CO	100	0	0	22	2.5	34	2h57m	4h23m	1h26m	48.9 (100)	61.1 (100)	79.2 (100)	94.9 (100)	5.1 (100)	5.8 (100)
A1	99	1	0	22	2.5	34	2h57m	4h05m	1h08m	49.2 (101)	71.6 (117)	94.7 (120)	101.6 (107)	5.9 (116)	7.3 (126)
A2	98	2	0	22	2.5	33	2h55m	3h50m	0h55m	49.8 (102)	72.6 (119)	95.8 (121)	102.5 (108)	6.2 (122)	8.3 (143)
A3	97	3	0	22	2.5	33	2h48m	3h40m	0h52m	52.0 (106)	82.2 (135)	97.6 (123)	105.8 (111)	6.6 (129)	10.0 (172)
A5	95	5	0	22	2.5	32	2h16m	3h06m	0h50m	53.0 (108)	86.1 (141)	98.8 (125)	108.8 (115)	7.3 (143)	10.9 (188)
B2	98	0	2	22	2.5	35	3h50m	4h45m	0h55m	47.5 (97)	61.0 (100)	84.2 (106)	101.5 (107)	5.2 (102)	6.3 (109)
B3	97	0	3	22	2.5	35	4h35m	5h20m	0h45m	47.3 (97)	60.4 (99)	92.0 (116)	104.3 (110)	5.0 (98)	6.7 (116)
B5	95	0	5	22	2.5	36	4h45m	5h28m	0h43m	47.0 (96)	60.0 (98)	95.3 (120)	106.9 (113)	4.9 (96)	7.1 (122)

^a Penetration depth.

Estudios de E. Guneyisi et al. 2014 [35] demostró que dentro de varios tratamientos usados, el humo de sílice produjo una reducción de absorción de agua de 20–11% y 6–4% para tamaños de 4–8 y 8–16 mm.

2.4.2 Tratamiento con Cristal o sodio silicato (WG)

El sodio silicato también conocido como “waterglass” es usado ampliamente en la industria del cemento ya que usado para sellar puede mejorar las propiedades superficiales así como la resistencia, permeabilidad, durabilidad y abrasión J. La Rosa Thompson et al. 1997 [36]

Existen investigaciones donde usaron tratamientos con algunos de estas soluciones, como Güneyisi et al. 2014 [35], donde se investigan los efectos de la dispersión de Cristal usando árido reciclado grueso, proveniente de probetas de 20 MPa según Turkish Earthquake Regulation, obteniendo la siguiente **tabla 2.7** de resultados de la consistencia.

Tabla 2.7 Consistencia [35]

Mix description	T_{500} (s)	Slump-flow (mm)
RCA (control)	3.9	700
RCA-HCl	3.81	725
RCA-WG	1.59	720
RCA-TSM	2.5	700
RCA-CSF	1.65	715

Los resultados de la tabla 2.12 [35] muestran que el uso de WG presenta un ligero incremento de la consistencia del 2.85 %, esto es asociado a la disminución de la absorción permitiendo más agua libre presente en la mezcla.

En el trabajo de Gao et al. [37], se utilizan áridos reciclados con inmersión en WG, obteniendo la siguiente **tabla 2.8**

Tabla 2.8. Resultados tratamientos áridos [37]

Tratamiento	Absorción	Densidad aparente
Sin tratar	3,94%	2,41 g/cm ³
Sodio silicato	1,08%	2,59 g/cm ³
Emulsión de polímeros	0,85%	2,48 g/cm ³

En la **tabla 2.8** se observa una disminución de la absorción y un aumento de la densidad aparente con el tratamiento de WG.

Morteros con WG son estudiados por Kazemian et al. 2010 [38] donde se han desarrollado en una variedad de diferentes sistemas de lechada. Estos sistemas contienen un reactor/acelerador conseguir fuertes propiedades de unión en un sistema de dos compuestos. Este sistema produce un aumento de la viscosidad a altas proporciones de WG por cortos periodo de tiempo y lo opuesto a bajas proporciones de WG, debido a las reacciones intensivas de reacción con los iones de OH.

Ademas, Güneyisi et al. 2014 [35] presenta graficas de las propiedades mecánicas de las mezclas realizadas en las figura 2.21 y figura 2.22.

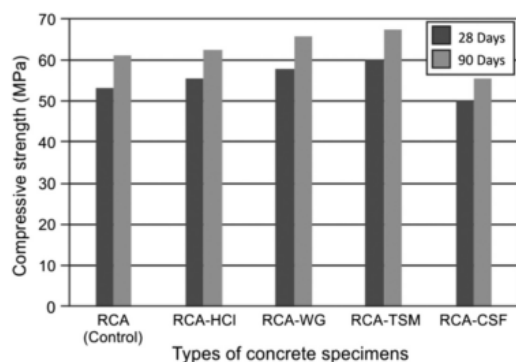


Figura 2.21 Resistencia a la compresión [35]

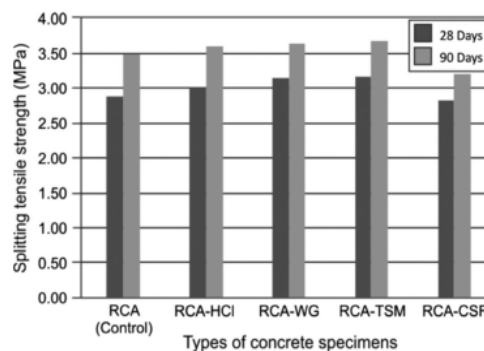


Figura 2.22 Resistencia a la tensión [35]

El uso de WG presenta un incremento de la resistencia a la compresión cerca del 9 y 7 % a 28 y 90 días de curado, respectivamente. Debido a las mejoras en los resultados de ITZs consecuencia de la capa de lecha de cemento formada en la superficie de los áridos reciclados que conduce a llenar las grietas y huecos.

La resistencia a la flexión presenta similar tendencia, presentando valores para el uso de WG con incrementos de 9% para 28 días y 4 % para 90 días de curado, también asociado a las mejoras de ITZs.

Gao et al. [37] también estudia la evolución de la resistencia a la compresión para hormigón con 100 % de substitución con sus tratamientos propuestos, resultando la **figura 2.23**.

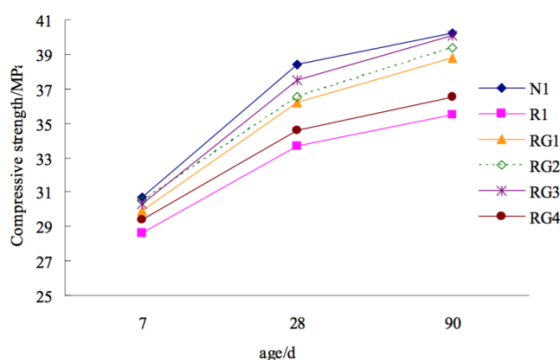


Figura 2.23. Resistencia a la compresión [37]

El **gráfico 2.23** muestran una tendencia similar en todos los tratamientos usados, incrementando a mayor tiempo de curado, además, entre los tratamientos se puede observar que el árido tratado con cristal RG1, tiene una mayor resistencia a la compresión que el árido sin tratar RG de 4 y 7 % para curados de 28 y 90 días. Otra observación de la **gráfica 2.23** es

que árido de control con áridos naturales N1 tiene mayor resistencia a la compresión que el árido con tratamiento de WG cercanos al 5 y 4 % a 28 y 90 días de curado, respectivamente.

Chen et al. 2006 utilizó 5, 10%, 20%, 30% y 40 % de WG para inmersión por 1 h, 5h, y 24 resultando que el tiempo de remojo afectó las propiedades del RCA significativamente. La concentración óptima fue de 5 % con 1 h de remojo. Su trabajo concluyó que una concentración mayor y un tiempo de ajuste más largo afectaría su resistencia a compresión.

2.4.3 Tratamiento con nano partículas de Sílice (NS)

De acuerdo a estudios de Laureano Cornejo Álvarez, 2014 [56] la adición de nanopartículas mejora la microestructura de hormigón, efecto investigado con compuestos entre otros el nanosílice (SiO_2). Además, en los mismos estudios [56] se probó que las nano partículas de sílice son más beneficiosas que las cenizas volantes en la fabricación de hormigón reciclado estructural. Por otro lado, debido a la posesión de enlaces insaturados, las nanopartículas de sílice más potentes y reactivos que las macropartículas de sílice. Por lo tanto, la aplicación de NS es digno de ser considerado en la fabricación de hormigón.

En el experimento planteado por Kou et al. 2008 [47], se ensayó probetas de hormigón con dosis diferente de concentraciones de NS en 100 % de reemplazo por áridos reciclados, pero manteniendo la relación w/c. Obteniendo los siguientes resultados en la **tabla 2.9**

Tabla 2.9 Pruebas de Resistencia a la compresión, Trabajabilidad y Absorción [47]

Mix no.	Compressive strength (MPa)			Workability (mm)	Water absorption (%)
	3 days	7 days	28 days		
NC-350	10.2	16.3	23.6	120–130	–
RA1-350	7.3	12.4	19.1	80–90	–
RA2-350	8.3	14.9	22.4	40–50	–
RA3-350	10.6	17.1	24.3	20–30	–
NC-400	15.2	24.3	34.2	120–130	2.12
RA1-400	12.6	19.6	28.1	90–100	3.01
RA2-400	13.9	22.9	32.4	60–70	2.44
RA3-400	15.9	24.6	35.3	30–40	2.17
NC-450	19.4	31.4	41.8	130–140	–
RA1-450	16.3	25.1	35.3	90–100	–
RA2-450	17.6	29.3	40.1	60–70	–
RA3-450	20.9	32.1	43.7	30–40	–

Debido a problemas de dispersión por aglomeración de las nano partículas se recomienda bajos porcentajes (1.5 y 3%) de nano partículas usadas como reemplazo de cemento. [14]. Para reducir estos problemas de aglomeración, se utiliza un superplastificante de tipo naphthalene-type, de la misma manera su mejora la trabajabilidad del hormigón. También demostrado en otros estudios [47]

Kou et al. 2008 [47] describe como la trabajabilidad se reduce por el empleo de áridos reciclado grueso. Debido a la mayor porosidad de la superficie del agregado reciclado causado por el mortero adherido, el agregado reciclado tiene mayor capacidad de absorción.

Absorción

Kou et al. 2008 [47] concluye que el incremento en la capacidad de absorción es debido a la mayor superficie expuesta en el árido reciclado.

Resistencia a la compresión

Resultados de los estudios Shi et al. 2008 [42] muestran que la resistencia a la compresión en HCP es mejorada con adiciones de NS especialmente en edades tempranas de curado y que la actividad puzolánica de NS es mayor que la del SF.

En estudios sobre NS [42] se encontró que en todas las muestras de hormigones con NS mostraron mayor resistencia que el control, especialmente a los 3 días de curado. Además, con el incremento de la concentración de NS la resistencia se incrementó.

Otras investigaciones como Burgos et al. 2015 [40] estudiaron la influencia del tratamiento superficial de los áridos reciclados gruesos en el mejoramiento de la resistencia a la compresión de los hormigones.

ITZ

Estudios [42] encontraron que todas las resistencias de unión con Nano partículas de sílice eran obviamente superiores a los de control de ejemplo CO y mayores que con uso de humos de sílice.

2.5 Morteros con adición de cenizas volantes.

Una puzolana se define como un material silíceo o silíceo y aluminoso que en sí mismo posee poco o ningún valor cementoso, pero reaccionan químicamente con hidróxido cálcico a temperaturas ordinarias para formar compuestos que tienen propiedades similares al cemento. Las puzolanas incluyen cenizas volantes, humo de sílice y una variedad de puzolanas naturales, concepto definido por Michael Thomas [39]

En esta etapa del trabajo se investiga la influencia de la incorporación de adiciones, en este caso cenizas volantes, sobre las características del mortero en estado fresco y endurecido. La incorporación de cenizas volantes se realiza substituyendo el 30 % en peso del cemento con un nivel de dosificación moderado de acuerdo a la clasificación de la **tabla 2.10**, permitiendo la reducción del uso de cemento sin sacrificar las propiedades del material final. Esto finalmente se traducirá en reducción de costes y energía, además de beneficios ecológicos.

Tabla 2.10 Nivel de dosificación de las CV [39]

Table 1. Dosage Levels of Fly Ash	
Level of Fly Ash % by mass of total cementitious material	Classification
<15	Low
15-30	Moderate
30-50	High
>50	Very High

Investigaciones previas como las de Burgos et al. 2012 [40] Burgos et al 2015 [41] Shi H. et al 2008 [42] Michael Thomas [39] han demostrado que la adición de CV como sustituto parcial del cemento en morteros y hormigones contribuye adicionalmente en las propiedades mecánicas y la reología de las mezclas. De la misma manera lo afirma la agencia ID/DICYT en México [43] manifiesta que usar CV puede dotar de mayor resistencia y menor peso siendo muy útil a la industria de la construcción.

Otro de los efectos estudiados por Burgos et al 2015 [41] Amahjour et al [44] Headwater resources [45] es la reacción puzolánica que actúa aumentando la densidad y reduciendo su permeabilidad, esto es debido al refinamiento del tamaño de poros e interferencia en la conectividad de los mismos.

Los resultados de permeabilidad realizada Burgos et al 2015 [41] se presentan en la **tabla 2.11** siguiente.

Tabla 2.11 Ensayos de Permeación [41]

Adición de CV (%)		0	10	20	30
Resultados Succión Capilar	K ($\text{kg/m}^2\text{seg}^{1/2}$)	0,015	0,013	0,021	0,024
	m (10^7 s/m^2)	4,16	4,29	4,17	3,75
	Porosidad efectiva ϵ_0 (%)	9,7	8,6	13,6	14,7
Resultados de Porosidad y absorción	Porosidad total (%)	16,68	19,40	21,51	23,26

En la **Tabla 2.11** se presentan los resultados del ensayo de permeación, los cuales indican un aumento general en el porcentaje total de poros para las muestras adicionadas con CV, lo que concuerda con lo reportado por Mejía y Rodríguez. 1999 [46] quienes exponen que la porosidad total podría llegar a ser mayor en mezclas adicionadas con puzolanas comparadas con mezclas sin adición puzolánica. Aunque se observa que la porosidad efectiva con 10 % de CV muestra una reducción su valor, indicando que fue efectiva la modificación de la microestructura.

Otros resultados de Burgos et al 2015 [41] acerca de la resistencia a la compresión se presentan en la **tabla 2.12**

Tabla 2.12 Resistencia a la compresión en morteros con y sin CV a 28 d [41]

Adición de CV (%)	0	10	20	30
Resistencia a Compresión (MPa)	23,59	31,91	18,39	16,14

Los resultados de la resistencia a compresión a los 28 días de curado muestra que con 10 % de CV se obtiene una mejora del 35 % aunque a mayores proporciones existe una disminución de hasta el 31 %, respecto a esta variación Burgos et al 2015 [41] afirma que este comportamiento puede invertirse a mayor tiempo de curado, debido a las reacciones puzolánica puede avanzar a mayor grado.

Otras investigaciones con respecto al uso de CV son las de Niman Priyanka Ekka et al. 2015 [47], donde analiza el uso de 10 % de CV y reemplazos de áridos reciclados hasta un 100%, obteniendo resultados mostrados en la **figura 2.24** y la **tabla 2.13** siguientes-

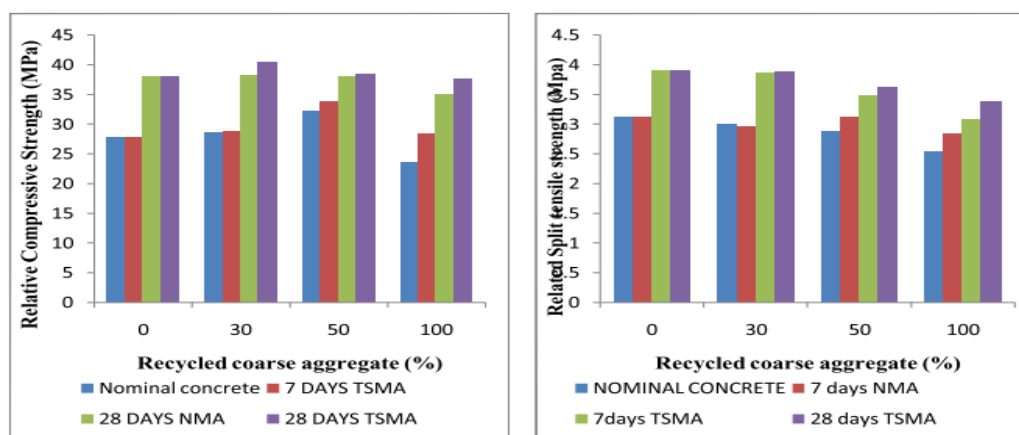


Figura 2.24 Resistencia a la Compresión y Flexión en morteros con 10% de CV [47]

Tabla 2.13 Resistencia a la Flexión [47]

S.NO.	Mix Designation	Mixing Approach	Split Tensile strength (MPa)		Flexural strength (MPa)
			7 days	28 days	
1	Nominal mix M30	NMA	3.11	3.901	6.36
2	RAC30+F10	NMA	3.005	3.855	6.25
		TSMA _{FS}	2.97	3.89	6.36
3	RAC50+F10	NMA	2.87	3.48	5.15
		TSMA _{FS}	3.11	3.62	5.34
4	RAC100+F10	NMA	2.545	3.075	4.23
		TSMA _{FS}	2.83	3.39	4.23
5	RAC100+F0	NMA	2.445	3.02	4.23
		TSMA _{FS}	2.69	3.18	5.15

Los resultados muestran que la resistencia a compresión y tensión de los hormigones disminuye respecto a uso de áridos reciclados hasta 18 % a 7 días (con 100% de AR y 10% de CV), y 21% a 7 días con la misma composición anterior.

De la misma grafica se obtiene que el uso de CV con 100 % de reemplazo de áridos reciclados, los valores de la resistencias a tensión mejora ligeramente, con valores de Al utilizar 100 % de AR pero sin CV se obtienen perdidas en la resistencia ligeramente mayores cercanos al 2 %.

También realizan estos estudios S. C. Kou et al 2004 [48] con mezclas de CV con 25% y 35 % en peso, manteniendo la relación w/c en 0.45 y uso de áridos reciclados hasta un 100 % de reemplazo obteniendo resultados respecto a la compresión en la siguiente **tabla 2.14** y **tabla 2.15**.

Tabla 2.14 Resistencia a la compresión de hormigones [48]

Table 5 Compressive strength of concrete mixtures with standard water curing

NOTATION	FLY ASH (%)	RECYCLED AGGREGATE (%)	COMPRESSIVE STRENGTH (MPa)				
			1-day	4-day	7-day	28-day	90-day
R0	0	0	25.8	45.8	53.8	66.8	72.3
R20	0	20	23.6	43.2	51.2	62.4	68.0
R50	0	50	21.1	40.3	44.8	55.8	61.5
R100	0	100	15.5	26.8	36.2	42.0	50.2
R0 F25	25	0	17.6	32.6	39.9	54.4	69.0
R20 F25	25	20	13.2	28.9	34.1	49.7	68.7
R50 F25	25	50	11.6	25.7	31.3	44.3	65.2
R100F25	25	100	11.1	21.4	28.6	39.5	52.3
R0 F35	35	0	12.8	25.6	30.6	45.9	56.6
R20 F35	35	20	11.6	23.6	28.5	43.6	55.8
R50 F35	35	50	10.9	21.2	26.3	40.4	52.3
R100F35	35	100	9.9	20.5	25.3	38.3	50.9

Tabla 2.15 Resistencia a la Flexión de Hormigones [48]

NOTATION	FLY ASH (%)	RECYCLED AGGREGATE (%)	SPLITTING TENSILE STRENGTH (MPa)				
			1-day	4-day	7-day	28-day	90-day
R0	0	0	2.15	2.89	2.92	3.43	3.81
R20	0	20	1.91	2.28	2.85	3.16	3.62
R50	0	50	1.64	2.19	2.66	2.97	3.17
R100	0	100	1.41	2.15	2.59	2.84	3.02
R0 F25	25	0	1.40	2.06	2.39	3.42	3.50
R20 F25	25	20	1.08	1.69	2.05	3.14	3.21
R50 F25	25	50	1.03	1.84	2.13	3.10	3.16
R100F25	25	100	0.99	1.75	2.04	2.85	2.99
R0 F35	35	0	0.95	1.33	1.48	2.30	3.15
R20 F35	35	20	0.84	1.29	1.41	2.21	3.02
R50 F35	35	50	0.82	1.49	1.35	2.19	2.98
R100F35	35	100	0.79	0.98	1.48	2.19	2.99

Igual que las investigaciones previas , S. C. Kou et al 2004 [48] muestra en sus datos que la resistencia a la tensión y la resistencia a la compresión disminuye respecto al incremento en el uso de áridos reciclados. A edades tempranas de curado, las propiedades mecánicas decrecen con el uso de CV, pero conforme aumenta el tiempo de curado se muestra un cambio mostrando beneficios evidentes para el grupo con 25 % de CV.

3 MATERIALES Y METODOLOGIA

3.1 Introducción

En este capítulo se explicará los procedimientos para la obtención de los materiales y su caracterización, así como las metodologías para la obtención de sus propiedades físicas y los tratamientos aplicados.

Los áridos reciclados provienen de probetas de hormigón de 25 y 30 MPa los cuales serán tratados independientemente para su posterior comparación. Estos áridos reciclados, serán caracterizados con el fin de usarlos como reemplazo de los áridos finos de 0/4 mm en la etapa de fabricación de los morteros empleando un reemplazo del 25% y 50 % de los áridos finos.

Antes de la fase de fabricación, se realizarán pruebas de tratamientos en los áridos reciclados con el fin de evaluar los cambios en sus propiedades físicas con ensayos de densidad y absorción. Además de conocer la absorción del material reciclado de tal manera que en el momento de la fabricación esta característica no interfiera en la relación w/c.

En la etapa de fabricación, para mantener las condiciones de óptimas para comparar las dosificaciones propuestas de mortero reciclado, se ha procurado mantener constante la relación w/c y cantidad de cemento utilizado. Después, de manera que se pueda comparar las características y propiedades del mortero reciclado se han diseñado diferentes configuraciones de mortero que incluye variación en los porcentajes de sustitución, tratamientos a los áridos, y resistencia de las probetas de origen. Por lo tanto, se incluirá en este capítulo la caracterización de los materiales usados y los procesos seguidos para su utilización.

Las cantidades fabricadas incluyen probetas de 4x4x16 cm en dos fases de fabricación. La primera utilizando cemento CEM II 42.5 A-L en su totalidad y la segunda fase de fabricación reemplazando el 30 % en peso del cemento por cenizas volantes. Estas probetas serán analizadas a 7, 28 y 90 días para obtener resultados de las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad.

3.2 Caracterización de los materiales

3.2.1 Cemento

El cemento utilizado durante la fase de fabricación fue un CEM II 42.5 A-L, descrito en las **tabla 3.1** y **tabla 3.2**

Tabla 3.1 Componentes y Características del cemento

COMPONENTES Y CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO	NOMENCLATURA	ESPECIFICACIÓN
Clinker	K (%)	80-94
Caliza	L (%)	6-20
Componentes minoritarios	CM (%)	0-5
Inicio de fraguado	m	>60
Final de fraguado	m	<=720
Cloruros	Cl (%)	<0.15
Sulfatos	SO ₃ (%)	<4%
Expansión	(mm)	<10

Tabla 3.2 Composición del Cemento

COMPOSICIÓN	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
%	20.1	3.6	4.8	63.5	1.2	2.9

3.2.2 Cenizas Volantes

Las cenizas volantes tienen una densidad de 2320 kg/m³ y una superficie específica de 3360.0 cm²/g cuya composición química se muestra en la **tabla 3.3**

Tabla 3.3 Composición de las Cenizas Volantes

COMPOSICIÓN	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	LOI
%	55.46	26.94	5.86	5.70	1.50	1.51	1.41	0.83	0.62	3.70

3.2.3 Áridos

Los áridos que han sido empleados durante el proceso de fabricación del hormigón, se muestran a continuación:

- Áridos Naturales: Arena caliza fina de 0/4 mm.

- Áridos reciclados: Áridos finos fracción 0/4 mm reciclados obtenidos mediante machacado de probetas de 25 MPa y 30 MPa. El machacado fue realizada en trituradoras de mandíbulas.



Figura 3.1 Trituradora de Mandíbulas

Granulometría de los áridos naturales y de los áridos reciclados

Para determinar el tamaño de las partículas de los áridos ensayados, se ha utilizado la norma UNE EN 933-1:1998, especifica los tamaños nominales y la forma de las aberturas de los tamices empleados. Se ha utilizado los siguientes tamices para determinar la granulometría de los áridos. Para el caso de los áridos finos son: 5, 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125, 0.063, P.

Densidad de los áridos naturales y de los áridos reciclados

Los estados de humedad de los áridos están clasificados en 4 tipos:

- Áridos húmedo o saturados (sat): Cuando todos los poros permeables de la partícula se encuentran saturados y hay una capa de agua en su superficie
- Áridos Saturados y superficie seca (sss): Los poros se encuentran saturados, pero su superficie se encuentra libre de humedad
- Áridos totalmente seco (sec): El árido es secado en un horno a 100°C, toda el agua contenida por los poros permeables es evaporada.
- Áridos secos: Áridos que no han sido secado en horno, por lo general tienen algo de agua contenida en sus poros, aunque no aparenten estar húmedos.

La realización del presente ensayo, se ha seguido la normativa UNE-EN 1097-6:2001, se ha usado el método del picnómetro.

- Saturar la muestra sumergida en agua durante 24 horas,
- Tamizar el material saturado por un tamiz de 0.063mm para la eliminación de la cantidad de finos que hay en la muestra.
- Se seca la muestra con un secador para eliminar la humedad superficial del árido
- Con la superficie seca, introducir en un cono y posteriormente realizar 25 golpes para retirar el cono para ver la caída de la arena, entonces pesar la muestra.

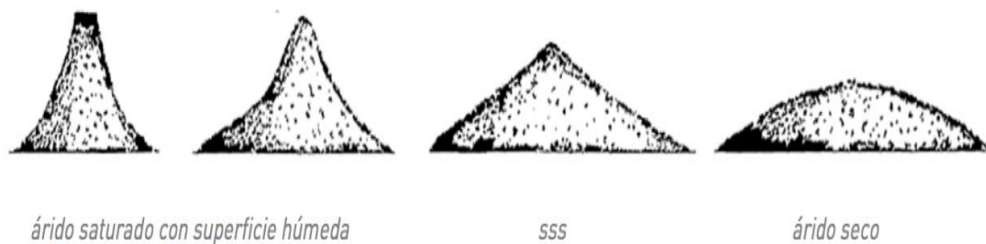


Figura 3.2 Estado de caída del cono

- Con la muestra saturada con la superficie seca y pesada, introducir en el picnómetro la muestra con agua.
- Se pesa el picnómetro con agua y la muestra.
- Colocar la muestra en una bandeja para proceder al secado en una estufa de 105°C durante 24 horas, y
- Obtener el peso seco de la muestra ensayada.
- Calcular las propiedades del árido según formulas detalladas a continuación.

Densidad aparente de las partículas (D.a.)	$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$
Densidad de las partículas después del secado en la estufa (D.s.)	$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$
Densidad de las partículas saturadas con la superficie seca (D.s.s.s.)	$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$
Absorción de agua	$WA_{24h} = \frac{100 \cdot (M_1 - M_4)}{M_4}$

Donde;

- M_1 es la masa del árido saturado con la superficie seca, pesada al aire.
- M_2 es la masa del picnómetro que contiene la muestra del árido saturado.
- M_3 es la masa del picnómetro lleno de agua únicamente.
- M_4 es la masa de la muestra del ensayo seca en la estufa y pesada al aire.
- Densidad y capacidad de absorción del agua.

3.2.4 Mortero adherido del árido reciclado.

El árido reciclado de hormigón está compuesto por áridos naturales y cemento. El porcentaje se determina mediante uno de los ensayos expuestos anteriormente, el cual es por medio de tratamiento térmico, definido por M.S. de Juan, P.A. Gutiérrez [49], como se detalla a continuación

- Eliminar las impurezas y sumergirla en agua durante dos horas.
- Drena en una mufla y dejarla por dos horas a 500°C.
- Sumergir en agua, produciendo un contraste térmico.
- Después de este proceso, si aún existe un poco de mortero enganchado en la muestra este se remueve con un martillo de goma.
- Al remover el mortero, la muestra es tamizada por un tamiz de 4 mm donde obtenemos el peso del árido reciclado que queda.
- El mortero enganchado se calcula como:

$$\% \text{ de mortero} = \frac{m_I - m_f}{m_I} * 100$$

3.2.5 Aditivo

La dispersión de las partículas es un factor importante para el cálculo de la cantidad de tratamiento necesaria, ya que permite la dispersión por toda la solución, permitiendo una mejor absorción superficial. Para esto se usó el superplastificante **SIKA VISCOCRETE 20HE** con dosificaciones recomendadas de entre 0.5% y el 1.5% del peso del conglomerante. Los efectos que produce el aditivo son:

- Reducción muy importante de contenido de agua del amasado, obteniendo hormigones de alta resistencia y grandes impermeabilidades.
- Altas resistencias iniciales.
- Disminución de la fluencia y la retracción.
- Retardador de los efectos de la carbonatación del hormigón.

3.2.6 Humo de sílice (SF)

EL humo de sílice tiene la característica de ser un grano de diámetro de 180nm y densidad $2.22\text{m}^2/\text{g}$, cuya composición básica está compuesta esta descrita en la **tabla 3.4**

Tabla 3.4 Composición del humo de sílice

COMPOSICIÓN	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ 1	CaO	MgO	SO ₃
%	92.1	2.04	1.08	0.45	0.58	0.44

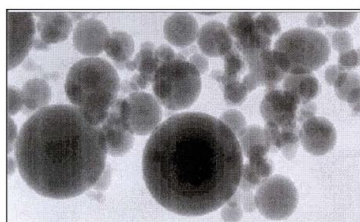
3.2.7 Sodio Silicato o Cristal (WG)

También llamado silicato de sodio Na₂SiO₃, tiene una masa de 122.07 g/mol y densidad a 4-20°C de 1.365 g/cm^3 y un pH de 11.5 con disolución del 5 % en agua.

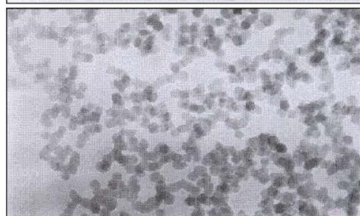
Tabla 3.5 Composición del Cristal

COMPOSICIÓN	Cobre	Plomo	Níquel
%	Max. 0.005	Max. 2.04	Max. 0.005

3.2.8 Nano partículas de sílice (NS)



*MICROSÍLICE CONVENCIONAL
Superficie específica BET = 20 m²/g*



*MEYCO MS 685
Superficie específica BET = 200 m²/g*

La microsílice, debido a su extrema finura, aumenta el índice de compacidad del hormigón, reduciendo la permeabilidad, y aumenta también las resistencias finales gracias a su puzolanidad.

El Nano sílice, también llamado BASF o MEYCO MS 685 [50] es un producto sintético de extrema pureza basado en sílice sintética de tamaño nanométrico, cuya concentración es del 22 % y tiene una superficie específica de 200 m²/gr.

Figura 3.3 Microestructura de partículas de Nano sílice

Tabla 3.6 Característica del Nano sílice [50]

CARACTERÍSTICA	ESPECIFICACIÓN
Función principal:	Reductor de agua de alta actividad/ superplastificante
Efecto secundario:	Riesgo de disgregación a dosis elevadas
Aspecto físico:	Líquido amarillento turbio
pH, 20° C:	5,5 ± 1
Densidad, 20° C:	1,048 ± 0,02 g/cm ³
Viscosidad 20° C Brookfield Sp00/100rpm:	< 100 cps
Contenido en cloruros:	< 0,1%

3.2.9 Bomba de vacío

La bomba de vacío permite la eliminación del aire contenido dentro de los poros del agregado reciclado por lo que permitiría una mejor saturación con la solución del tratamiento preparado. La bomba será usada en ensayos a 3 horas.



Figura 3.4 Áridos colocados en la bomba de vacío

3.3 Tratamientos a los áridos reciclados

El tratamiento consiste en la impregnación de la solución escogida, determinando el porcentaje más efectivo para uso. Esto sería el de menor porcentaje respecto al mortero adherido y mayor cambio en sus propiedades físicas. La óptima para áridos finos se calculó en el estudio referencia [51] en 5 % de la cantidad de mortero para las dos fases de fabricación.

Los tratamientos en los áridos reciclados tienen por finalidad la mejora de las propiedades físicas de acuerdo a investigaciones mencionadas en los apartados anteriores, para esto se utiliza la siguiente dosificación para cada uno de los tratamientos.

Tabla 3.7 Dosificación para los tratamientos con áridos reciclados

MORTERO	ARENA (gr)	AGUA (gr)	TRATAMIENTO USADO (gr)	USO DE BOMBA DE VACIO	TIEMPO DE EXPOSICION AL TRATAMIENTO (h)
Mortero Control	500,00	-	-	-	-
Morteros con SF	500,00	1000,00	8,00 de SF	SI	3 HORAS
Morteros con WG	500,00	1000,00	8,00 de WG	NO	3 HORAS
Morteros con NS	500,00	971,64	36,34 de NS	SI	3 HORAS

Tomando como base la preparación de 500 gramos de áridos reciclados, se utiliza la dosificación para cada tratamiento, tomando en cuenta que el NS está diluido por lo que se reduce la cantidad de agua en la mezcla final.

Para identificar las modificaciones de las propiedades físicas de los áridos tratados será necesario realizar varias pruebas de absorción y densidad y así para poder comparar con los áridos no tratados y con los áridos naturales. Las pruebas de absorción y densidad son las mismas metodologías explicada en el apartado 3.2.3

Las dos fases de fabricación utilizan los parámetros que mostraron las mayores mejoras para los áridos reciclados en los ensayos anteriores a este TFM, los cuales son:

- Los tratamientos con humo de sílice y nano partículas de sílice utiliza bomba de vacío.
- Los tratamientos con cristal no utiliza bomba de vacío.
- Los tratamientos tienen un tiempo de duración en la solución de 3 horas.
- Porcentaje de relación tratamiento vs áridos establecido en 5 %.

3.3.1 Procedimiento de los tratamientos usados.

El método usado para los todos los tratamientos es el de exposición de los áridos reciclados, mediante el lavado esta detallado a continuación:

- Secar los áridos de 30 MPa y de 25 MPa en estufa a 100 ° C por 24 h , al final dejar enfriar a temperatura ambiente.
- Pesar 500 gr de árido y se los coloca en un recipiente.
- Preparar una disolución con agua y el tratamiento más el aditivo superplastificante
- Mezclar durante 3 minutos y se lo coloca en el recipiente con los áridos.
- Dejar actuar al tratamiento , reposando la mezcla por el tiempo necesario 3h, con o sin bomba de vacío.
- Extraer el agua de forma que quede el árido reciclado.
- Se colocan los áridos en una bandeja metálica para proceder a secar en estufa a 100 ° C por 24 h,
- Guardar los áridos tratados en bolsas plásticas.



Figura 3.5 Mezcla de tratamiento con SF



Figura 3.6 Exposición de los áridos con tratamiento

4 METODOLOGÍA Y ENSAYOS EN EL MORTERO

4.1 Introducción

La parte final del estudio experimental está en la fabricación del mortero, donde se podrá comparar las modificaciones en las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad del mortero con áridos reciclados tratados.

Como se mencionó en apartados anteriores, la fabricación consta de dos etapas, las cuales constan de 17 tipos de morteros para la primera fase, y 9 tipos de morteros para la segunda.

4.2 Proceso de fabricación del mortero

4.2.1 Fabricación del mortero

La fabricación de todos los morteros se ha realizado en el laboratorio de Materiales de la Construcción del Departamento de la Ingeniería de la Construcción de la UPC, conservando el mismo proceso y dosificación para todos los diseños.

- Se introduce el cemento CEM II 42.5 A-L y el agua en la amasadora (En la segunda fase además del cemento se agregará las cenizas volantes). Todo esto se mezcla a velocidad baja por 30 segundos.
- Mientras continua la agitación, en 30 segundos, se introducen los áridos finos (naturales y/o reciclados, según la dosificación).
- Al llegar al minuto 1, se cambia a velocidad rápida por 30 segundos más.
- Se detiene la mezcla para proceder a realizarlo manualmente por 1 min, alcanzando así partes de difícil acceso para el equipo.
- Se retoma la acción de mezclado con el equipo a velocidad alta por 1 min más.
- Al finalizar el amasado la mezcla se coloca en moldes estándares de 4x4x16 cm, previamente pintados con aceite para evitar que la mezcla quede adherida en los bordes del molde.
- Se compacta el material en dos fases, la primera con el molde lleno hasta la mitad y utilizando el equipo de compactado se dan 60 golpes, luego de esto se termina de llenar el molde y se compacta nuevamente con 60 golpes del equipo.
- Se guardan las probetas en la cámara húmeda, donde se espera 24 horas para proceder a marca según nomenclatura establecida anteriormente, luego de esto se las mantiene en la cámara húmeda hasta ser necesarias para los ensayos planificados.



Figura 4.1 Amasadora para mortero



Figura 4.2 Molde para morteros

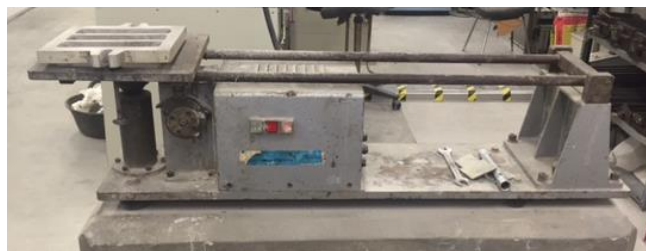


Figura 4.3 Máquina de compactación.

4.2.2 Tipología del Mortero

La primera fase consta de 17 fabricaciones por cada tipo de árido reciclado que se detalla a continuación:

Tabla 4.1 Tipología de Mortero Fabricado para la fase 1

NOMENCLATURA	TIPOLOGÍA DE MORTERO
MC	Mortero Convencional o Mortero de Control
MR 25-25	Mortero con sustitución del 25 % de áridos finos procedente de hormigón de 25 MPa.
MR 25-50	Mortero con sustitución del 50 % de áridos finos procedente de hormigón de 25 MPa.
MR 30-25	Mortero con sustitución del 25 % de áridos finos procedente de hormigón de 30 MPa.
MR 30-50	Mortero con sustitución del 50 % de áridos finos procedente de hormigón de 30 MPa.
MR 25-25 SF	Mortero con sustitución del 25 % de áridos finos tratados con humo de sílice al 5% procedente de hormigón de 25 MPa.
MR 25-25 WG	Mortero con sustitución del 25 % de áridos finos tratados con cristal al 5% procedente de hormigón de 25 MPa.
MR 25-25 NS	Mortero con sustitución del 25 % de áridos finos tratados con nano partículas de sílice al 5% procedente de hormigón de 25 MPa.

MR 25-50 SF	Mortero con substitución del 50 % de áridos finos tratados con humo de sílice al 5% procedente de hormigón de 25 MPa.
MR 25-50 WG	Mortero con substitución del 50 % de áridos finos tratados con cristal al 5% procedente de hormigón de 25 MPa.
MR 25-50 NS	Mortero con substitución del 50 % de áridos finos tratados con nano partículas de sílice al 5% procedente de hormigón de 25 MPa.
MR 30-25 SF	Mortero con substitución del 25 % de áridos finos tratados con humo de sílice al 5% procedente de hormigón de 30 MPa.
MR 30-25 WG	Mortero con substitución del 25 % de áridos finos tratados con cristal al 5% procedente de hormigón de 30 MPa.
MR 30-25 NS	Mortero con substitución del 25 % de áridos finos tratados con nano partículas de sílice al 5% procedente de hormigón de 30 MPa.
MR 30-50 SF	Mortero con substitución del 50 % de áridos finos tratados con humo de sílice al 5% procedente de hormigón de 30 MPa.
MR 30-50 WG	Mortero con substitución del 50 % de áridos finos tratados con cristal al 5% procedente de hormigón de 30 MPa.
MR 30-50 NS	Mortero con substitución del 50 % de áridos finos tratados con nano partículas de sílice al 5% procedente de hormigón de 30 MPa.

Los morteros para la segunda fase se describen en la siguiente **tabla 4.2**, serán fabricados reemplazando 30 % en peso del cemento por cenizas volantes.

Tabla 4.2 Tipología de Mortero Fabricado para la fase 2

NOMENCLATURA	TIPOLOGÍA DE MORTERO
MCC	Mortero Convencional o Mortero de Control, con cenizas volantes
MRC 30-25	Mortero con cenizas volantes y con substitución del 25 % de áridos finos procedente de hormigón de 30 MPa.
MRC 30-50	Mortero con cenizas volantes y con substitución del 50 % de áridos finos procedente de hormigón de 30 MPa.
MRC 30-25 SF	Mortero con cenizas volantes y con substitución del 25 % de áridos finos tratados con humo de sílice al 5% procedente de hormigón de 30 MPa.
MRC 30-25 WG	Mortero con cenizas volantes y con substitución del 25 % de áridos finos tratados con cristal al 5% procedente de hormigón de 30 MPa.
MRC 30-25 NS	Mortero con cenizas volantes y con substitución del 25 % de áridos finos tratados con nano partículas de sílice al 5% procedente de hormigón de 30 MPa.
MRC 30-50 SF	Mortero con cenizas volantes y con substitución del 50 % de áridos finos tratados con humo de sílice al 5% procedente de hormigón de 30 MPa.
MRC 30-50 WG	Mortero con cenizas volantes y con substitución del 50 % de áridos finos tratados con cristal al 5% procedente de hormigón de 30 MPa.
MRC 30-50 NS	Mortero con cenizas volantes y con substitución del 50 % de áridos finos tratados con nano partículas de sílice al 5% procedente de hormigón de 30 MPa.

4.2.3 Dosificación

La dosificación empleada durante la fase de fabricación se ha realizado mediante un modelos de dosificación patrón donde se debe mantener la relación w/c efectiva . En esta fase experimental fue una w/c de 0.45 para ambas fases de fabricación.

La dosificación detallada en la **tabla 4.3** fue fijada para poder comparar los resultados entre las distintas tipologías de mortero fabricado para la fase 1

Tabla 4.3 Dosificación de Mortero Fabricado para la fase 1

MORTERO	CEMENTO (gr)	ARENA (gr)	ARENA RECICLADA (gr)	AGUA (gr)	w/c
MC	500	1500	-	250	0,45
MR 30-25	500	1125	314	273	0,45
MR 30-25 SF	500	1125	297	273	0,45
MR 30-25 WG	500	1125	303	274	0,45
MR 30-25 NS	500	1125	306	272	0,45
MR 30-50	500	750	628	296	0,45
MR 30-50 SF	500	750	594	296	0,45
MR 30-50 WG	500	750	605	298	0,45
MR 30-50 NS	500	750	614	293	0,45
MR 25-25	500	1125	307	275	0,45
MR 25-25 SF	500	1125	307	273	0,45
MR 25-25 WG	500	1125	307	275	0,45
MR 25-25 NS	500	1125	307	274	0,45
MR 25-50	500	750	614	301	0,45
MR 25-50 SF	500	750	614	296	0,45
MR 25-50 WG	500	750	614	299	0,45
MR 25-50 NS	500	750	614	299	0,45

La dosificación empleada durante la fase 2 de fabricación se ha establecido reemplazando 30 % en peso del cemento por cenizas volantes, quedando detallado la dosificación en la **tabla 4.4** siguiente.

Tabla 4.4 Dosificación de Mortero fabricado para la fase 2

MORTERO	CEMENTO (gr)	CENIZAS VOLANTES (gr)	ARENA (gr)	ARENA RECICLADA (gr)	AGUA (gr)	w/c
MCC	350	150	1500	-	250	0,45
MRC 30-25	350	150	1125	314	273	0,45
MRC 30-25 SF	350	150	1125	297	273	0,45
MRC 30-25 WG	350	150	1125	303	274	0,45
MRC 30-25 NS	350	150	1125	306	272	0,45
MRC 30-50	350	150	750	628	296	0,45
MRC 30-50 SF	350	150	750	594	296	0,45
MRC 30-50 WG	350	150	750	605	298	0,45
MRC 30-50 NS	350	150	750	614	293	0,45

Cabe mencionar que solo se establece la fase 2 para morteros procedentes de probetas de 30 MPa debido a que fueron los que se obtuvieron mejores resultados respecto a sus propiedades mecánicas y durabilidad en el estudio anterior [51].

4.2.4 Ensayos del mortero en estado fresco

Los ensayos a realizar en el mortero recién mezclado son los de estado fresco, los cuales se realizan en paralelo a la fabricación.

- **Consistencia**

Para todos los morteros fabricados se realiza la medición de la consistencia según la norma UNE-EN 1015-3 “Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas).[52]”

Este ensayo tiene por finalidad medir el valor de escurrimiento de los morteros una vez realizada la mezcla, para esto se sigue el siguiente procedimiento:

- Se llena un molde estandarizado completamente y se lo enrasa.
- Este molde es colocado en la mesa de sacudidas también normalizada.
- Se retira el molde y se procede a realizar 15 golpes de pistón en 15 segundos.
- Se finaliza midiendo con una regla el valor del escurrimiento del mortero.

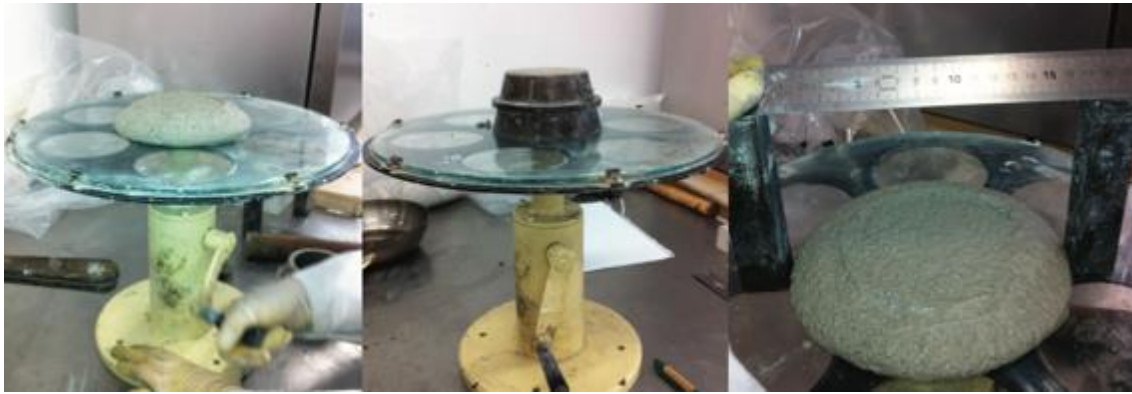


Figura 4.4. Ensayo consistencia

De acuerdo a la misma norma empleada anteriormente para la medición de la consistencia, UNE-EN 1015-3, se pueden clasificar a los morteros según su consistencia, la cual se muestra en la **tabla 4.5**:

Tabla 4.5 Clasificación de los morteros según su consistencia [52]

Mortero Fresco	Consistencia (Ecurrimiento en mm)	Tipo
Seco	<140	S
Plástico	140 a 200	P
Fluido	≥ 200	F

- **Densidad del mortero fresco**

La normativa utilizada para los ensayos del mortero en estado es la norma UNE-EN 1015-6: 1999.[53] Este ensayo consta de un molde de dimensiones y medidas estándar, el cual

El molde es llenado, compactado y enrasado según la normativa antes expuesta. Finalmente se pesa y se obtiene los resultados.



Figura 4.5 Ensayo densidad mortero fresco

4.2.5 Ensayos del mortero en estado endurecido

Se realizaron ensayos de compresión y flexión a 7, 28 días y 90 días, de igual manera se realizaron ensayos de densidad y absorción para 7, 28 días y 90 días.

- **Ensayo a flexión y compresión**

El ensayo de flexión y compresión se realiza según la norma UNE-EN 1015-11 [54]

El ensayo a flexión, se realiza con 2 probetas, luego de esto se saca una media y ese será el valor de la resistencia a flexión del mortero a 7, 28 y 90 días respectivamente. La carga empleada se aplica sin aceleraciones bruscas, a una velocidad uniforme comprendida entre 10 N/s y 50 N/s, de tal modo que la rotura se produzca entre 30 s y 90 s.

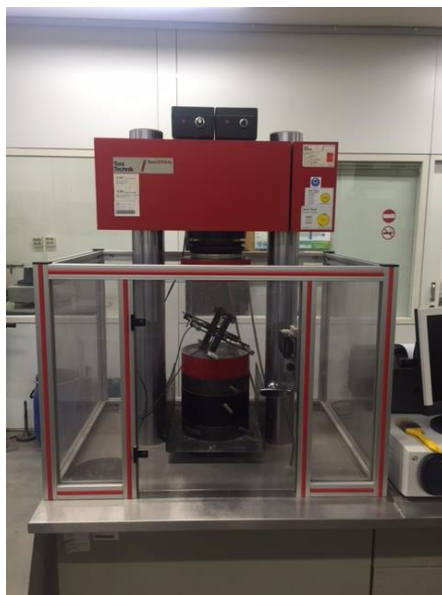


Figura 4.6 Prensa mecánica.

Una vez realizado el ensayo de flexión se continua con el ensayo a compresión. El ensayo anterior termina por partir las probetas utilizadas en dos, por lo que se utilizan los 4 pedazos de probetas para el nuevo ensayo.

El ensayo a compresión determina la resistencia de un material hasta que se produce la rotura, normalmente calculado a los 28 días y 3 meses de su fabricación, según la normativa UNE-EN 12390-3.

La prensa mecánica actúa aumentando la tensión hasta su punto de ruptura que es su carga máxima alcanzada.

- **Densidad y absorción de agua**

Este ensayo fue realizado mediante la norma UNE-EN 1015:1999 “Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido”. [55]

Una vez teniendo la probeta curada a 7, 28 o 90 días y según la norma UNE-EN 1015-11, se procede a ensayar las muestras.

- Se sumerge la probeta en agua a temperatura constante de 24°C por un periodo de 24 horas.
- Se pesa en una balanza su peso bajo el agua y su peso saturado con superficie seca.
- Se colocan las probetas ensayadas en una cámara seca a una temperatura constante de 100°C por un periodo de 24 horas.
- Se pesan las probetas secas.

Para el cálculo de la densidad aparente (D.a.), densidad después del secado, absorción de agua y porcentaje de poros se utilizan las siguientes formulas:

Densidad aparente de las partículas
(D.a.)

$$D_a = \frac{M_3}{M_3 - M_2}$$

Densidad de las partículas después
del secado en la estufa (D.s.)

$$D_{ssaca} = \frac{M_3}{M_1 - M_2}$$

Absorción de agua

$$WA_{24h} = \frac{100 \cdot (M_1 - M_3)}{M_3}$$

% de poros

$$\%Poros = \frac{100 \cdot (M_1 - M_3)}{(M_1 - M_2)}$$

Donde;

- M_1 es la masa del mortero saturado con la superficie seca, pesada al aire.
- M_2 es la masa del mortero sumergido en agua.
- M_3 es la masa del mortero tras el secado en la estufa y pesada al aire.

5 RESULTADOS DE LA FASE EXPERIMENTAL PARA MORTEROS CON TRATAMIENTOS EN LOS ARIDOS RECICLADOS

5.1 Introducción

En esta sección se describirán los resultados obtenidos en todas etapas involucradas desde la obtención de la granulometría de los áridos y sus propiedades hasta la fabricación del mortero, de tal manera que expondremos en este capítulo los resultados de los ensayos descritos en los apartados anteriores.

A partir de este punto se establecerán comparaciones con los morteros fabricados por la referencia de este TFM [51]. La nomenclatura utilizada para esos morteros incluye la denotación (2) en el nombre del mortero, ya que se estableció con los mismos parámetros de diseño y dosificación que los realizados en la fase 1 de este trabajo.

5.2 Ensayos en los áridos.

- **Granulometría**

La granulometría obtenida para los **áridos natural triturados de 0/4mm (finos)**, se los muestra en la misma gráfica que los áridos naturales, para observar y comparar su tamaño.

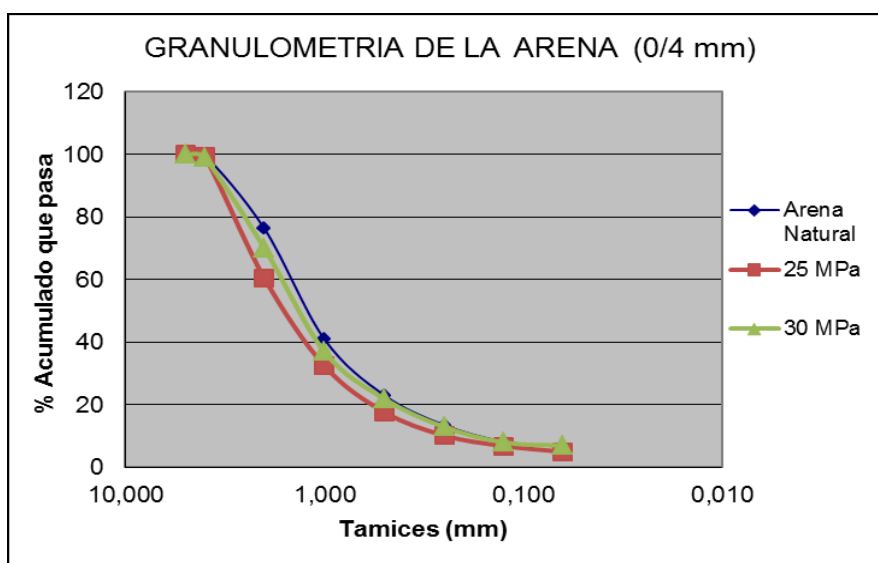


Figura 5.1 Granulometría de Arena Natural y Reciclados de 0/4 mm.

Como se muestra en la **Figura 5.1**, la granulometría del árido reciclado de 25 MPa y 30 MPa es similar a la granulometría de la arena natural, existe una diferencia significativa en la cantidad de finos, menores a 0.063 mm, siendo este último para la arena natural en el orden del 5 % mientras que para el árido reciclado esta entre 9 y 10 %, esto concuerda con estudios con áridos reciclados como los de [56] [16] por lo que se realiza un lavado para los áridos reciclados por un tamiz 230 (0.063 mm).

- **Mortero Adherido**

Los resultados están expuestos en la tabla 5.1:

Tabla 5.1 Resultados tratamiento térmico

MUESTRA	CONTENIDO
Árido	20%
Mortero	80%

Se determinó que aproximadamente el 16% en peso del árido era cemento.

- **Densidad y absorción Áridos naturales y Áridos reciclados**

Los valores encontrados de densidad y absorción están descritos en la **tabla 5.2** siguiente los cuales son necesarios para el cálculo de la cantidad de agua a utilizar en la etapa de fabricación de los morteros.

Tabla 5.2 Propiedades de los áridos

TIPO DE ÁRIDOS	PROC.	DENSIDAD (gr/cm ³)	ABSORCIÓN (%)
Áridos Naturales	-	2,59	1,67
Áridos Reciclados	25 MPa	2,12	10,30
Áridos Reciclados	30 MPa	2,17	9,33

Los datos obtenidos concuerdan con otros estudios como [6] [56] donde encuentran valores similares en cuanto al incremento de la absorción y disminución de la densidad por parte de los áridos reciclados respecto a los áridos naturales, esto es debido a la presencia de mortero adherido el cual tiene mayor capacidad de absorción y menor densidad, teniendo en cuenta que mientras mayor la cantidad de mortero adherido, mayor será el cambio que produzca en sus propiedades.

- **Densidad y absorción Áridos reciclados con tratamientos.**

Los áridos reciclados tratados con 3 diferentes soluciones se muestran en la **tabla 5.3** a continuación.

Tabla 5.3 Propiedades de los áridos con tratamientos.

Tipo de Áridos	Proc.	Densidad (gr/cm3)	Absorción (%)	Proc.	Densidad (gr/cm3)	Absorción (%)
Áridos Naturales	-	2,59	1,67	-	-	-
Áridos Reciclados	25 MPa	2,12	10,30	30 MPa	2,17	9,33
Áridos Reciclados con SF		2,12	9,48		2,05	9,85
Áridos Reciclados con WG		2,12	10,09		2,09	9,95
Áridos Reciclados con NS		2,12	10,01		2,07	8,88

Los cambios más significativos en esta etapa se dan en los áridos reciclados de 25 MPa, demostrando que, aunque se mantenga la densidad constante la absorción disminuye ligeramente. Esto corresponde con los estudios previos donde establecen un cambio en la estructura superficial de los áridos, ya sea utilizando humo de sílice como en el estudio [4], haciéndolos más impermeables creando una película de polímero en la red de los poros como los estudiados por [37] [57] con cristal o reduciendo el tamaño de los poros con tratamientos con nano partículas de silicio como los estudiados por [58] [59] [60] .

5.3 Ensayos al mortero en estado fresco

Los primeros resultados para los morteros son en estado fresco, por lo que a continuación se expondrán los valores de consistencia y densidad.

- **Consistencia**

De acuerdo a la normativa vigente UNE-EN 1015-3, los resultados obtenidos de la primera fase de fabricación tras realizar el ensayo muestran en la **tabla 5.4**

Tabla 5.4 Consistencia de morteros primera fase

MORTERO	CONSISTENCIA (CM)	MORTERO	CONSISTENCIA (CM)
MC	12,80	-	-
MR 25-25	14,21	MR 25-50	16,09
MR 25-25 SF	14,28	MR 25-50 SF	16,21
MR 25-25 WG	14,22	MR 25-50 WG	16,18
MR 25-25 NS	14,28	MR 25-50 NS	16,38
MR 30-25	14,61	MR 30-50	16,03
MR 30-25 SF	14,52	MR 30-50 SF	16,41
MR 30-25 WG	15,01	MR 30-50 WG	16,33
MR 30-25 NS	14,61	MR 30-50 NS	16,49

Los valores muestran que el mortero de control obtiene el valor menor situándolo en un tipo de consistencia seca, mientras que los morteros con una sustitución del 25% presentan un valor mayor mostrando una consistencia plástica. Aquellos morteros con sustituciones del 50% aunque tienen valores mayores de consistencia que los anteriores, aunque todos se mantienen en valores para consistencia plástica.

La consistencia está relacionada con la cantidad de agua libre que posee el mortero en estado fresco, esto se ve claramente en los valores de la tabla de consistencias anterior al observar el aumento de la consistencia debido aumento en el reemplazo de árido natural por árido reciclado. Esto se debe a que el árido reciclado requiere una mayor cantidad de agua y por lo tanto al realizar el amasado estas mezclas presentan una mayor agua libre y por lo tanto su consistencia es mayor. Esto concuerda con los estudios de Z. Zhao et al.[29]

Otra cambio observado es relacionado al aumento de la consistencia debido a los tratamientos utilizados, obteniendo los mayores valores para las sustituciones del 50 % y el uso de nano partículas de sílice para material de 25 y 30 MPa. Con aumentos de hasta 3.13 % .

Los valores de la consistencia obtenidos concuerdan con los datos de [51] descritos en su trabajo, con una diferencia menor al 1%.

Los resultados obtenidos, de la segunda fase de fabricación son los presentados en la **tabla 5.5:**

Tabla 5.5 Consistencia de morteros segunda fase

MORTERO	CONSISTENCIA (CM)	MORTERO	CONSISTENCIA (CM)
MCC	15,60	-	-
MRC 30-25	17,70	MRC 30-50	19,40
MRC 30-25 SF	17,80	MRC 30-50 SF	19,90
MRC 30-25 WG	18,40	MRC 30-50 WG	19,80
MRC 30-25 NS	17,80	MRC 30-50 NS	20,00

Como se puede observar, existe un aumento de valores en la consistencia del material para todas las muestras de los morteros pero manteniéndose en la zona de consistencia plástica, esto es debido al reemplazo con cenizas volantes, lo cual es asociado a la reacción puzolánica donde se reduce la permeabilidad debido al refinamiento e interferencia de los poros [44][45]. Adicional a esto, mantiene la relación de aumento de consistencia a mayor reemplazo por áridos reciclados mostrados en los ensayos de la fase 1.

- **Densidad en fresco**

Los resultados obtenidos para la primera fase de fabricación sobre el ensayo de la densidad siguiendo la metodología explicada en el apartado 4.2.4 en estado fresco son los siguientes:

Tabla 5.6 Densidad en estado fresco morteros primera fase de fabricación

MORTERO	DENSIDAD g/cm ³	MORTERO	DENSIDAD g/cm ³
MC	2,25	-	-
MR 25-25	2,19	MR 25-50	2,11
MR 25-25 SF	2,16	MR 25-50 SF	2,11
MR 25-25 WG	2,17	MR 25-50 WG	2,10
MR 25-25 NS	2,18	MR 25-50 NS	2,10
MR 30-25	2,21	MR 30-50	2,13
MR 30-25 SF	2,20	MR 30-50 SF	2,13
MR 30-25 WG	2,19	MR 30-50 WG	2,13
MR 30-25 NS	2,20	MR 30-50 NS	2,13

Se puede observar de la tabla 5.5 que la densidad en fresco de los diferentes morteros disminuye cuando se aumenta el nivel de sustitución del árido reciclado, esto concuerda con los estudios realizados por R.V. Silva et al.[23], donde explica esta caída en la densidad debido a la presencia de mortero adherido. Los valores de densidad disminuyen un 2 % para los morteros con 25 % de reemplazo por áridos reciclados y 4.5% para los morteros con 50 % de reemplazo por áridos reciclados.

Respecto a los tratamientos utilizados, los cambios son del orden del 1%, lo cual no demuestra un cambio significativo en las propiedades en su estado fresco.

Para este caso también estos valores tienen una diferencia muy ligera con [51] con un variación menor al 1 %.

Los resultados obtenidos para la segunda fase de fabricación sobre el ensayo de la densidad en fresco son los siguientes:

Tabla 5.7 Densidad en estado fresco segunda fase de fabricación

MORTERO	DENSIDAD g/cm ³	MORTERO	DENSIDAD g/cm ³
MCC	2,24		
MRC 30-25	2,20	MRC 30-50	2,14
MRC 30-25 SF	2,19	MRC 30-50 SF	2,14
MRC 30-25 WG	2,19	MRC 30-50 WG	2,14
MRC 30-25 NS	2,21	MRC 30-50 NS	2,14

La segunda fase de fabricación muestra valores de densidad similares a los registrados en la fase 1, y con la misma tendencia en la disminución de su densidad respecto al aumento en la sustitución por áridos reciclados establecidos en los estudios de R.V. Silva et al.[23], aunque no existe un cambio evidente por la adición de cenizas volantes. Los valores de densidad disminuyen un 2 % para los morteros con 25 % de reemplazo por áridos reciclados y 4.5% para los morteros con 50 % de reemplazo por áridos reciclados.

5.4 Ensayos al mortero en estado endurecido

En el siguiente apartado se describirán los resultados obtenidos para los ensayos realizados al mortero en estado endurecido, resistencia a flexión y compresión, densidad y absorción.

- **Resistencia a compresión y flexión.**

Los resultados obtenidos para la primera fase de fabricación con curados de 7 y 28 días en la fase 1 son los siguientes:

Tabla 5.8 Flexión y Compresión a los 7 y 28 días de curado de la fase 1

MORTERO	FLEXION σ (MPa)		COMPRESION σ (MPa)	
	Flexión 7d	Flexión 28d	Compresión 7d	Compresión 28d
MC	8,13	9,48	42,40	50,29
MR 30-25	6,73	7,50	38,18	44,47
MR 30-25 SF	8,76	8,88	34,85	45,68
MR 30-25 WG	7,02	7,94	38,62	47,13
MR 30-25 NS	8,27	8,55	38,61	44,42
MR 30-50	6,50	7,43	34,04	39,29
MR 30-50 SF	7,74	7,77	34,62	43,35
MR 30-50 WG	6,48	7,27	32,24	40,02
MR 30-50 NS	8,01	8,22	34,64	42,11
MR 25-25	6,74	7,58	38,72	43,52
MR 25-25 SF	7,25	7,88	36,80	44,00
MR 25-25 WG	7,88	8,12	35,96	50,69
MR 25-25 NS	7,15	8,27	35,98	44,71
MR 25-50	6,74	7,15	33,57	38,97
MR 25-50 SF	7,08	9,30	32,55	40,10
MR 25-50 WG	6,43	7,39	34,50	40,83
MR 25-50 NS	7,03	9,60	32,16	39,42

Para los morteros fabricados con áridos provenientes de probetas de 30 MPa, cuyos resultados se muestran en la **tabla 5.8**, muestran evidencias mejoras a flexión especialmente los primeros días de curado con valores de hasta 30 % (MR 30-25 SF) y mejoras de 18.4 % (MR 30-25 SF) a 28 días de curado, los morteros con 50 % de substitución muestran mejoras similares aunque ligeramente inferiores. La resistencia a la compresión también muestra solo pequeñas mejoras comparadas con los resultados de flexión, alcanzando hasta 2% (MR 30-50 NS) a 7 días de curado y 10 % (MR 30-50 SF) a 28 días.

Para los morteros fabricados con áridos provenientes de probetas de 25 MPa valores también mostrados en la tabla 5.7 existen mejoras del 17 % para (MR 25-25 WG) con 7 días de curado y 34 % (MR 25-50 NS) con 28 días de curado. Los resultados a compresión muestran mejoras menores tales como 3% para (MR 25-50 WG) a 7 días de curado y 16% para MR 25-25 WG con 28 días de curado

Estos valores concuerdan con la referencia [51] donde se tiene una correspondencia con los resultados.

La evolución de las propiedades mecánicas en flexión de 7 y 28 días de curado para los áridos procedentes de probetas de 30 MPa se muestran en la siguiente gráfico.

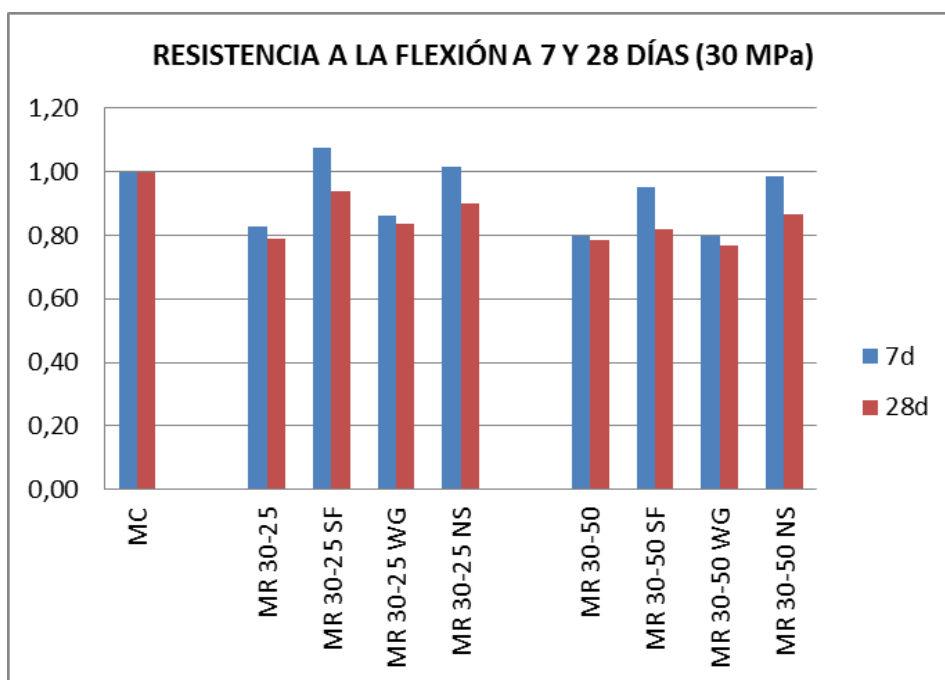


Figura 5.2 Resistencia a la Flexión a 7 y 28 días de Curado (30 MPa)

Del gráfico anterior se ve una tendencia generalizada en la disminución de la resistencia a la flexión conforme se aumenta el uso de AR llegando hasta un 20 % de pérdida con 50 % de substitución. Estos datos mejoran en la aplicación de tratamientos a edades tempranas de curado y menores a edades mayores.

La evolución de las propiedades mecánicas en flexión de 7 y 28 días de curado para los áridos procedentes de probetas de 25 MPa se muestran en la siguiente **gráfico 5.3**

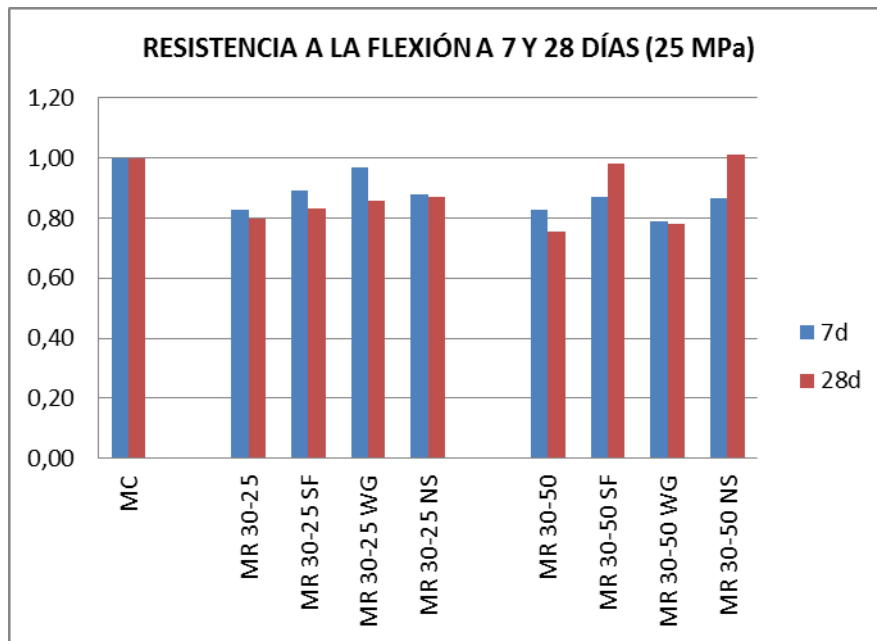


Figura 5.3 Resistencia a la Flexión a 7 y 28 días de Curado (25 MPa)

Este gráfico concuerda con los porcentajes de pérdida de resistencia por adición de AR de hasta 20 %, similar a su contraparte de 30 MPa, pero se destacan valores de mejora edades mayores de curado, especialmente con 50 % de substitucion.

La evolución de las propiedades mecánicas en compresión de 7 y 28 días de curado para los áridos procedentes de probetas de 30 MPa se muestran en la siguiente **figura 5.4**

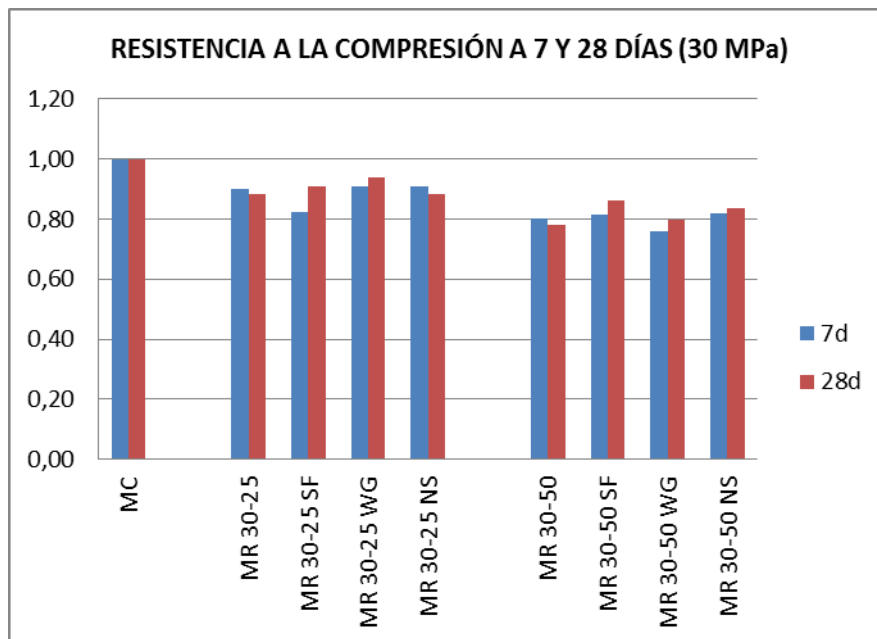


Figura 5.4 Resistencia a la Compresión a 7 y 28 días de Curado (30 MPa)

La resistencia a la compresión tiene una tendencia general como las anteriores, decrece conforme aumenta el uso de AR, pero contrario a las demás, las mejoras obtenidas en compresión son menores en ambos casos de tiempos de curado respecto a las mejoras a flexión.

La evolución de las propiedades mecánicas en compresión de 7 y 28 días de curado para los áridos procedentes de probetas de 25 MPa se muestran en la siguiente **figura 5.5**

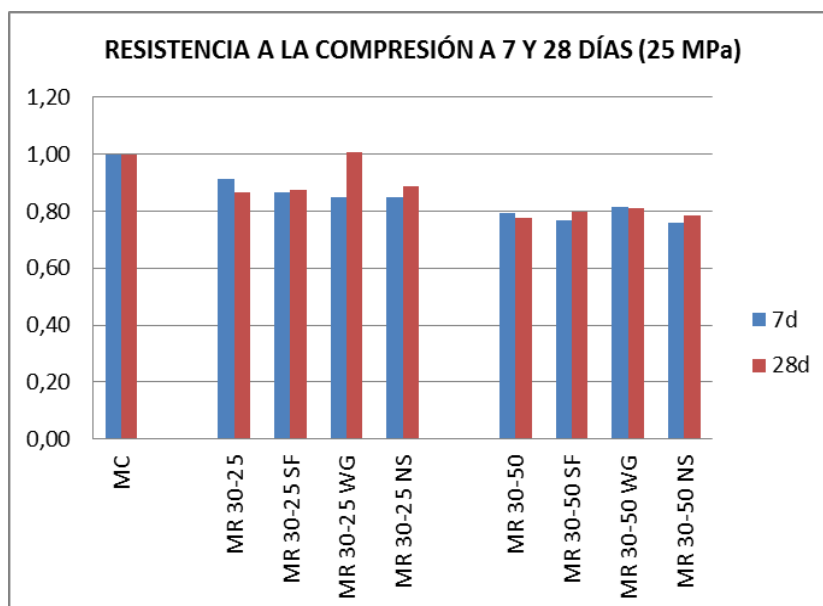


Figura 5.5 Resistencia a la Compresión a 7 y 28 días de Curado (25 MPa)

La resistencia a la compresión tiene una tendencia general como las anteriores, decrece conforme aumenta el uso de AR, pero contrario a la gráfica con áridos de 30 MPa, esta presenta una mejora considerable con WG a 28 días de curado.

Los resultados obtenidos para la segunda fase de fabricación a 7 y 28 días de curado son los siguientes:

Tabla 5.9 Flexión y Compresión a los 7 y 28 días de curado de la fase 2

MORTERO	FLEXION σ (MPa)		COMPRESION σ (MPa)	
	7 días	28 días	7 días	28 días
MCC	6,63	7,96	29,09	38,35
MRC 30-25	6,25	7,07	29,66	35,48
MRC 30-25 SF	6,35	6,84	29,83	35,53
MRC 30-25 WG	6,55	7,97	28,44	36,27
MRC 30-25 NS	6,36	8,04	29,28	37,13
MRC 30-50	5,87	6,70	25,57	37,05
MRC 30-50 SF	5,87	6,57	26,90	32,90
MRC 30-50 WG	6,45	8,00	27,82	35,00
MRC 30-50 NS	5,84	7,61	27,24	33,46

De la **tabla 5.9** para los morteros con cenizas volantes y 50 % de substitución por áridos reciclados, se evidencia un incremento de hasta 9.8 % en la resistencia a flexión a 7 días de curado con tratamiento de cristal y 8.81 % de mejora para la resistencia a la compresión en el mismo tipo de mortero.

Los morteros con 28 días de curado muestran mejoras de hasta 19.49 % en la resistencia a la flexión, igual tendencia que en el caso de 7 días de curado, para los morteros con tratamiento de cristal. Existen mejoras significativas del 12.66 y 13.65 % en la resistencia a la flexión para los morteros con 25 % de substitución con áridos reciclados tratados con cristal y nano partículas de sílice respectivamente.

La evolución de la resistencia a flexión de 7 a 28 días está realizada como ratios respecto a su mortero de control (MCC) respectivo, de forma que se pueda visualizar la estabilidad diferente tiempo de curado en la **figura 5.6** a continuación mostrada.

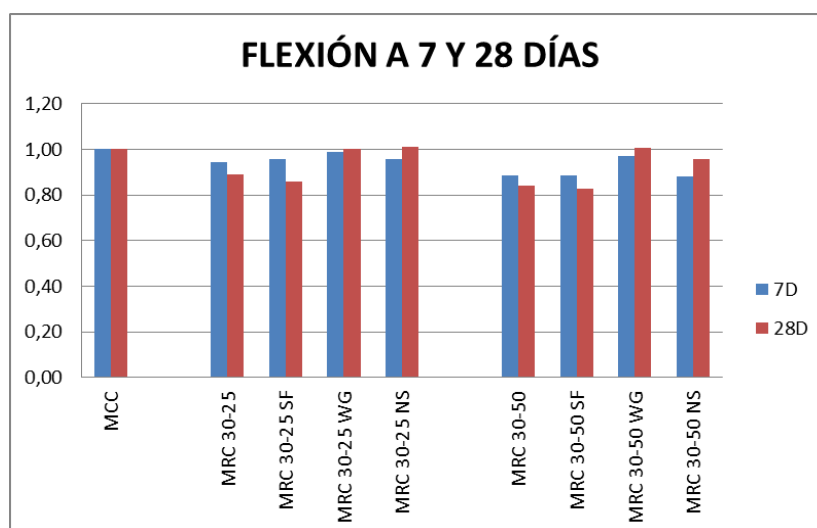


Figura 5.6 Resistencia a la flexión a 7 y 28 días

La resistencia a la flexión a 7 y 28 días muestra una tendencia ligeramente decreciente para los morteros de referencia respectivos (control, 25% y 50% de substitución) tanto para 7 días como para 28 días, pero mostrando mejoras debido a los tratamientos.

Lo más destacable, es que mientras los morteros de referencia, sin tratamientos, decaen un 5 y 10 % en su resistencia a la flexión para los morteros con 25 y 50 % de substitución con áridos reciclados respectivamente, los morteros con tratamientos incrementan su resistencia, especialmente para los morteros con cristal y nano partículas de sílice llegando a superar a su mortero de control a los 28 días de curado.

La evolución de la resistencia a compresión de 7 a 28 días está realizada como ratios respecto a su mortero de control respectivo de forma que se pueda visualizar su estabilidad en la figura 5.8 a continuación mostrada.

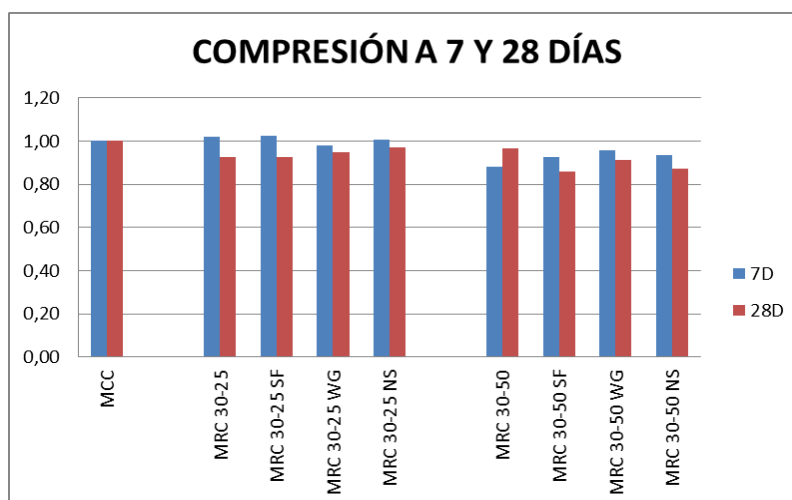


Figura 5.7 Resistencia a la compresión a 7 y 28 días

La figura 5.7 muestra una tendencia más estable a 7 días, incluso mostrando resistencias mayores para los morteros con 25% de sustitución que el mortero de control. Además, existe un aumento considerable en la resistencia de aproximadamente 30 % en todos los tipos de mortero.

El valor del mortero con tratamiento de nano partículas de sílice y 25 % de sustitución se destaca por su incremento respecto al mortero de referencia sin tratamiento en el orden del 6 % a 28 días de curado.

- **Gráficas comparativas entre fases de fabricado**

Adicional a las figuras anteriores se quiere establecer una comparativa de los cambios realizados por la incorporación de cenizas volantes en los morteros visualizados en la figura 5.8.

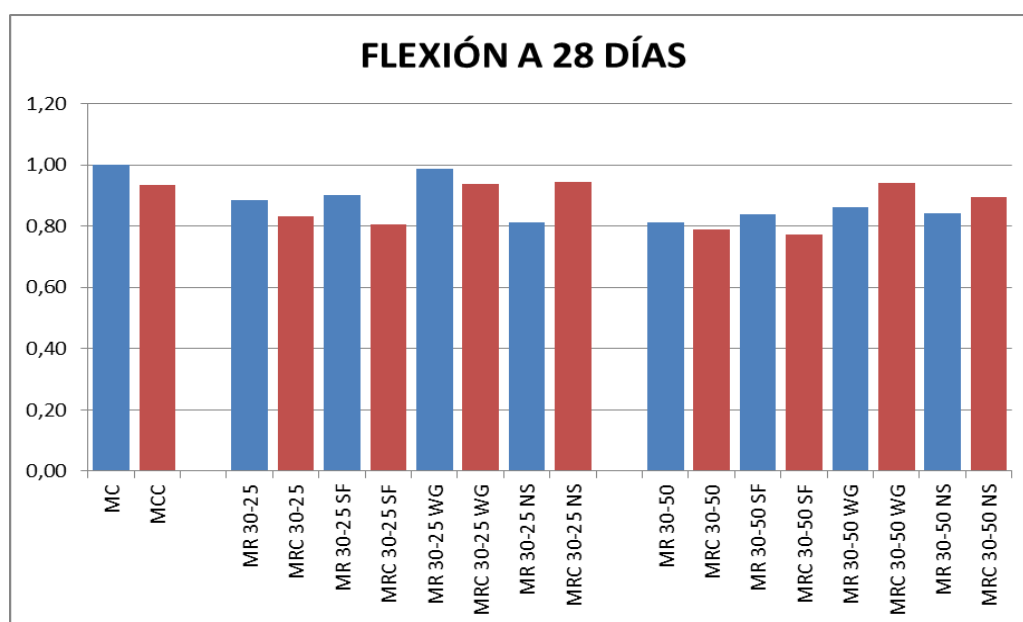


Figura 5.8 Resistencia a la flexión a 28 días para la fase 1 y fase 2

Existe una tendencia en la disminucion de la resistencia a flexion cercana al 5 % de los morteros de control y referencia con cenizas volantes respecto a su contraparte sin cenizas volantes. Estos cambios se conservan en el tratamiento con humo de silice.

Los morteros con cenizas volantes y tratamiento con cristal y nano particulas de silice muestran una mejora ligera respecto a los morteros sin cenizas volantes. Destacando estos tratamientos para ambas fases de fabricacion con mejoras respecto a sus respectivos morteros de referencia y muy cercanos a la mortero de control.

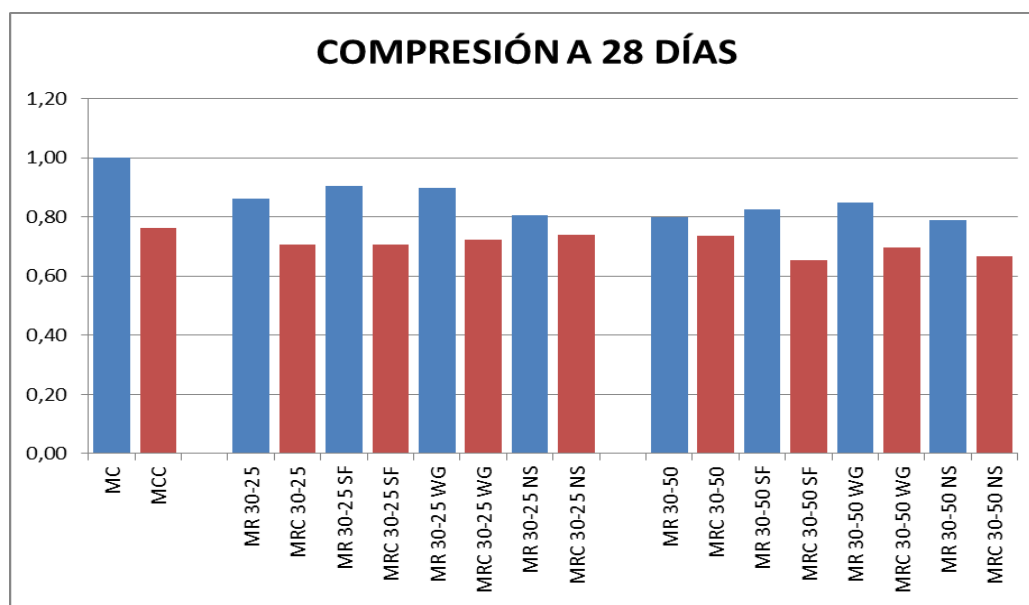


Figura 5.9 Resistencia a la compresión a 28 días para la fase 1 y fase 2

Existe una tendencia en la disminucion de la resistencia a compresión de los morteros de control con cenizas volantes respecto a su contraparte sin cenizas volantes mayor que la registrada en el caso de flexión. Estos cambios se conservan en todos los tratamientos realizados.

El mayor cambio se registra en el mortero de control con una disminucion de a resistencia del 24% y la minima variacion es para el motero 25 % de subtitucion con nano particulas de silice muestra una disminucion en sus resistencia a la compresion del 8 %.

Esta tendencia esta registrada en los estudios de [40] mostrando una reduccion de las propiedades mecanicas con 30 % de substitution de cenizas volantes, esperando que se pueda revertir ese valor a 90 dias de curado.

- **Densidad, absorción de agua y porosidad.**

Después de 28 días de curado se realizan ensayos de densidad, absorción y porcentaje de poros según la metodología explicada en el capítulo 4.

Tabla 5.10 Densidad y Porosidad de los morteros con áridos reciclados de la fase 1

MORTERO	DENSIDAD aparente seca	DENSIDAD aparente	ABSORCION DE AGUA	% DE POROS
MC	2,15	2,60	8,00	17,20
MR 25-25	2,07	2,62	10,20	21,10
MR 25-25 SF	2,05	2,59	10,20	20,90
MR 25-25 WG	2,07	2,60	9,80	20,30
MR 25-25 NS	2,06	2,59	9,80	20,30
MR 25-50	2,00	2,61	11,70	23,40
MR 25-50 SF	1,98	2,57	11,50	22,80
MR 25-50 WG	1,97	2,59	12,00	23,80
MR 25-50 NS	1,98	2,57	11,50	22,80
MR 30-25	2,09	2,64	10,00	20,90
MR 30-25 SF	2,09	2,61	9,50	19,90
MR 30-25 WG	2,08	2,61	9,80	20,30
MR 30-25 NS	2,07	2,62	10,10	20,90
MR 30-50	2,06	2,64	10,70	22,00
MR 30-50 SF	2,01	2,59	11,20	22,50
MR 30-50 WG	2,00	2,58	11,20	22,40
MR 30-50 NS	2,01	2,60	11,40	22,90

La densidad aparente seca decrece a medida que se va aumentando los áridos reciclados, esto es debido a la densidad de los áridos reciclados, también visto en estudios como Neno et al. [21] y I. Vegas et al. [25].

La densidad aparente no muestra cambios significativos en todos los tipos de morteros fabricados.

Los morteros fabricados con áridos de 25 MPa tienen una mejora en la absorción cercana 3.5% para los morteros con 25 % de sustitución y tratamientos con cristal y nano partículas de sílice y con el mismo cambio para la reducción del porcentaje de poros respecto a su mortero de referencia. Similares valores se dan para los morteros con reemplazo del 50 % del orden del 2 al 3 % pero respecto a los morteros con tratamientos con humo de sílice y nano partículas de sílice.

Los morteros fabricados con áridos de 30 MPa solo muestran mejoras para sustituciones del 25 % con áridos reciclados y con tratamientos de humo de sílice y cristal, con valores de 5,06 y 2,35 % de disminución en la absorción y valores de 4,94 y 2,66 % en la disminución de la porosidad respectivamente.

La segunda fase de fabricación se detalla en la **tabla 5.11** siguiente:

Tabla 5.11 Densidad y Porosidad de los morteros con áridos reciclados de la fase 2

MORTERO	DENSIDAD aparente seca	DENSIDAD aparente	ABSORCION DE AGUA	% DE POROS
MCC	2,12	2,54	7,77	16,48
MRC 30-25	2,04	2,55	9,77	19,94
MRC 30-25 SF	2,06	2,55	9,41	19,37
MRC 30-25 WG	2,04	2,57	10,08	20,55
MRC 30-25 NS	2,04	2,57	10,08	20,59
MRC 30-50	2,00	2,54	10,69	21,36
MRC 30-50 SF	2,00	2,55	10,90	21,78
MRC 30-50 WG	1,97	2,56	11,79	23,17
MRC 30-50 NS	1,96	2,57	11,94	23,45

Los morteros fabricados con cenizas volantes muestran una mejora en la absorción y porcentaje de poros para los morteros con 25 % de sustitución y tratamientos con humo de sílice, con valores de 3.68 y 2.84 % respectivamente.

Los resultados de la absorción de agua a 28 se muestra la **figura 5.10**

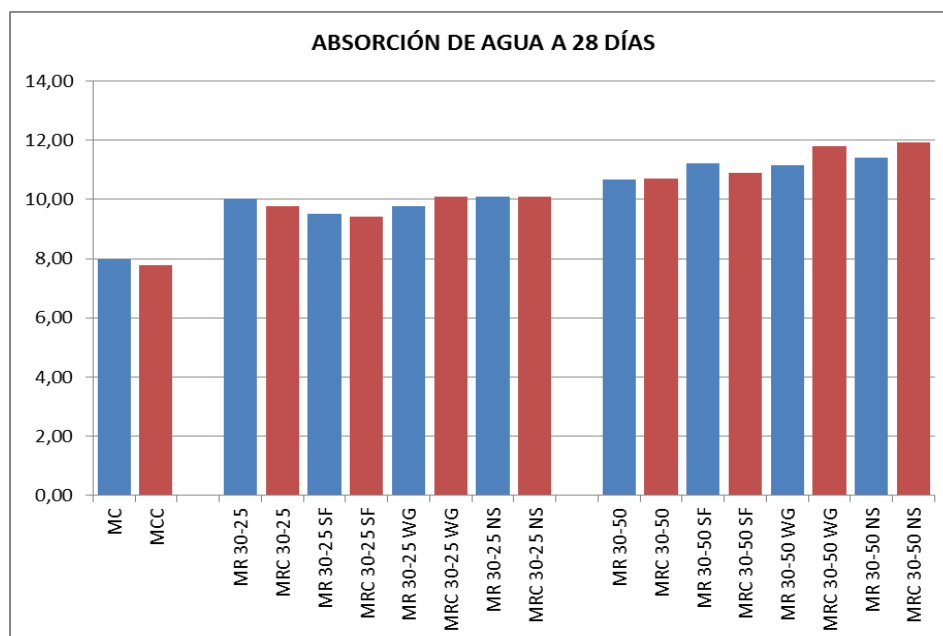


Figura 5.10 Absorción de agua a 28 días para la fase 1 y fase 2

La figura 5.10 muestra que existe una ligera variación en los valores de las fases de fabricación con una tendencia a incrementar la absorción respecto al aumento de reemplazo con áridos reciclados. En todos los casos el humo de sílice presenta los mejores resultados respecto a esta propiedad de los morteros. Esto está relacionado con los estudios previos descritos por [40].

Los resultados del porcentaje de poros a 28 días se muestra la **figura 5.11**

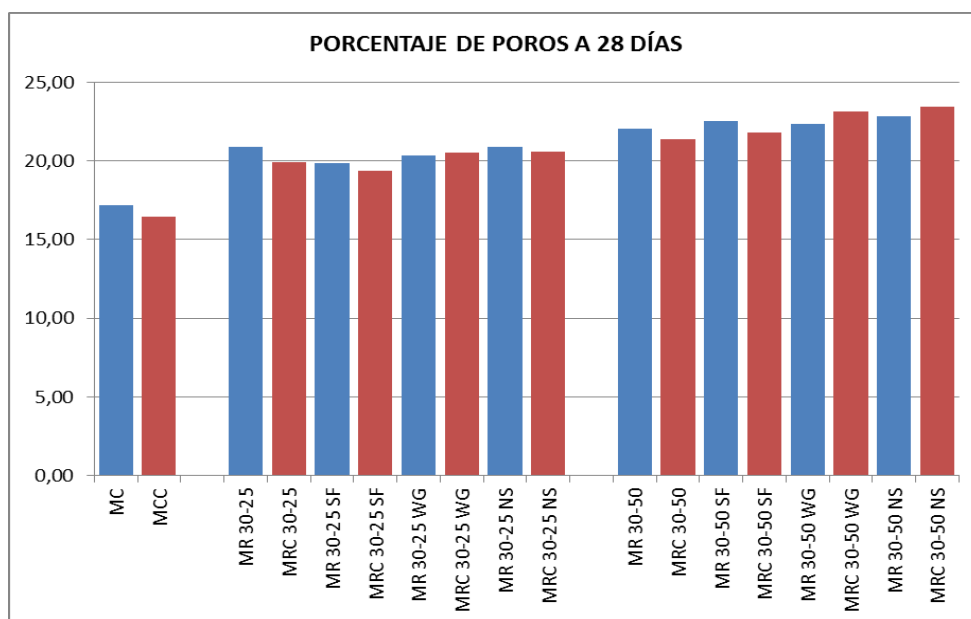


Figura 5.11 Porcentaje de poros a 28 días para la fase 1 y fase 2

Al igual que la gráfica anterior, los porcentajes de poros también presentan la misma tendencia, esto es una ligera mejora en el porcentaje de poros, y una tendencia a incrementar debido al aumento del reemplazo con áridos reciclados. Igual que la absorción, también esperado en estudios previos descritos por [40] [41]

Los resultados de la densidad aparente a 28 días se muestra la **figura 5.12**

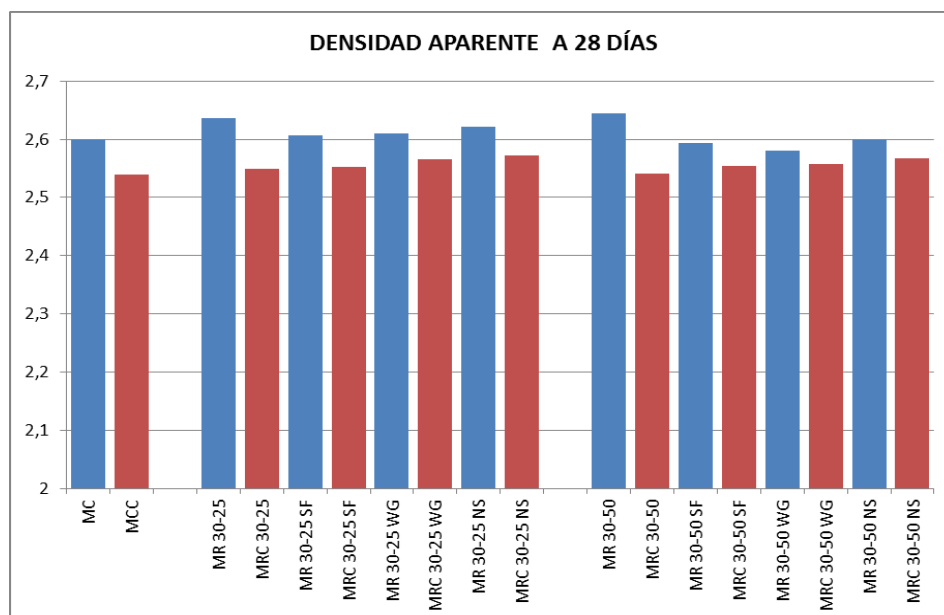


Figura 5.12 Densidad aparente a 28 días para la fase 1 y fase 2

Se evidencia de la gráfica un valor menor de densidad generalizado en todos los morteros fabricados, esto está contemplado según los estudios de [43], donde manifiesta que los morteros con cenizas volantes serían más ligeros. Esto en un 4 % en promedio.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Introducción

Las conclusiones serán desarrolladas en el presente apartado de acuerdo al análisis de los resultados de los trabajos experimentales comparando en cada una de las propiedades la utilización de los tratamientos y el uso de cenizas volantes.

6.2 Propiedades Físicas

Granulometría

Los áridos reciclados generados por machacado en las instalaciones de la UPC, cumplieron con las granulometrías normadas, lo cual es necesario para utilizarlo como reemplazo de los áridos naturales. Los resultados sobre la absorción están dentro de lo esperado por todos los estudios previos, en el cual para los áridos reciclados aumentaba su valor respecto a los áridos naturales, además de existir una variación según la calidad de origen de los áridos, existiendo un incremento de la absorción conforme bajaba la calidad de los áridos.

Absorción

Conforme a los tratamientos utilizados, el SF mejoró la absorción para los áridos de menor calidad mientras que los tratamientos con WG, y NS obtuvieron mejoras pero menores, por otra parte los áridos de mayor calidad, la mayor mejora lo produjo las nanopartículas de sílice, mientras que con los tratamientos de SF y WG su absorción se elevó.

6.3 Propiedades Mecánicas

Consistencia

La consistencia aumenta conforme se utilizan más áridos reciclados pero presenta fluctuaciones muy pequeñas en sus valores respecto al uso de tratamientos aunque en todas aumentan, esto confirma el aumento de agua libre conforme el uso de tratamiento. En esta etapa se puede comparar el uso de CV en la fabricación de morteros, los cuales presentan la misma tendencia a aumentar conforme aumenta el uso de áridos reciclados y el pequeño

aumento por uso de tratamientos. Adicional a esto, se confirma el aumento de trabajabilidad por el uso de CV debido a las reacciones puzolánica de permeabilidad e interferencia de los poros.

Densidad en estado fresco

La densidad en estado fresco de los morteros disminuye conforme se aumenta el uso de áridos reciclados, respecto a los tratamientos, las variaciones son pequeñas pero mostrando una pequeña disminución por el uso de los tratamientos utilizados. Otra diferencia se presenta en la calidad del árido usado, mostrando ligeramente una mayor densidad el árido de mayor calidad. El uso de cenizas volantes tiene valores muy similares a los morteros sin cenizas volantes, aunque tiene una mayor similitud con los áridos de mejor calidad.

Resistencia a la Flexión

Los resultados muestran que la resistencia a la flexión presenta las mayores mejoras, especialmente a edades iniciales de curado, esto con los tratamiento de WG y NS, incluso superando al mortero de control para el caso de WG y el NS con 25 % de substitución. A mayor tiempo de curado este comportamiento se mantiene pero no supera la resistencia del mortero de control. El uso de cenizas volantes disminuye ligeramente su resistencia de forma generalizada, aunque existe una mejora considerable con tratamiento con NS.

Resistencia a la Compresión

La resistencia a la compresión disminuye conforme el aumento de áridos reciclados, pero se observa mejoras respecto al uso de tratamientos, especialmente SF con 25% de substitución y NS con 50% de substitución, con los áridos de buena calidad. Respecto a los áridos de baja calidad, se observa una mejora considerable debido al uso de WG a edades tardías de curado. Respecto a al uso de CV, no se observa mejoras considerables comparados con los morteros sin CV.

Densidad en estado endurecido

La densidad está muy influenciada por la substitución de áridos reciclados, los valores de densidad disminuyen respecto al uso de AR. Se observa más una variación de la densidad ligera respecto al uso de tratamientos pero un poco mayor debido a la calidad de los áridos usados. El uso de cenizas volantes disminuye en todos los tipos de mortero su densidad. Esto confirma las teorías de que los morteros con CV son más livianos aunque esta diferencia es pequeña.

Absorción de agua

La absorción de agua presenta una tendencia a aumentar conforme el uso de áridos reciclados y disminuyen ligeramente por los tratamientos usados. Un mejor resultado fue con el tratamiento de WG, quien redujo más su absorción de agua. Respecto a los morteros con CV la absorción del mortero de control es menor que sin CV, a medida que se incrementa el árido reciclado este aumenta la absorción a mayor escala que su contraparte sin CV, hasta que con 50% de substitución los resultados son muy parecidos.

Porcentaje de poros

El porcentaje de poros tiende a aumentar conforme el uso de áridos reciclados y disminuyen ligeramente por los tratamientos usados. La calidad de los áridos también influye en el porcentaje de los poros mostrando mayor porcentaje de poros a menor calidad del árido. El uso de CV tiene el mismo efecto que en la absorción, comenzando con mayores diferencia con menor uso de áridos reciclados hasta ser muy parecidos al usar 50 % de áridos reciclados. Los tratamientos presentan una mejora en el porcentaje de poros, aunque el SF presenta mayores mejoras, esta tendencia se mantiene en los morteros con CV.

6.4 Conclusiones generales

Los cambios en las propiedades de los áridos reciclados son mayores a las mejoras que los tratamientos pueden corregir. Pero el SF fue el mejor respecto a la mejora de las propiedades físicas. De la misma manera las propiedades mecánicas fueron mejoradas por los tratamientos los tres, destacándose más el uso de WG. Finalmente, la durabilidad presenta mejores resultados con tratamientos con WG.

La correspondencia de la primera fase de fabricación, concuerda con los resultados de trabajos anteriores de Sánchez 2016 [51], que es la referencia inicial de esta tesina, con el fin no solo de reproducirlos y comprobar que los resultados se puedan repetir. Además, se hicieron más probetas, para obtener información a 90 días lo cual muy pocos trabajos analizan y compararlos con las adiciones de CV realizadas.

El uso de CV no presenta mejoras considerables respecto al uso de morteros sin CV, pero sus valores son cercanos, al tratarse de un coproducto, esto genera una utilidad ambiental considerable.

6.5 Futuras investigaciones

Los tratamientos empleados mejoran cada uno de ellos las propiedades de los morteros en diferentes medida, así que según su utilización, será más o menos adecuado su uso, por lo que recomiendo realizar un estudio de las aplicaciones más adecuadas para cada tratamiento y/o adiciones que puedan corregir o aumentar a un más su eficacia.

Las cenizas volantes mostraron valores ligeramente inferiores a los mostrados en todos los tipos de mortero. Esto usando 30 % de reemplazo del cemento, por lo que sería recomendable realizar un estudio de factibilidad para su uso futuro con el fin de disminuir costes de fabricación y reducción del impacto ambiental.

7 BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS

- [1] Asociación española de gestores de residuos de construcción y demolición, “Guía Española De Áridos Reciclados Procedentes De Residuos De Construcción Y Demolición (Rcd),” p. 292, 2011.
- [2] CSI, “The Cement Sustainability Initiative (CSI) - Sustainability with Concrete.” [Online]. Available: <http://wbcsdcement.org/index.php/key-issues/sustainability-with-concrete>.
- [3] A. hanouns, “Influencia de la variación de las propiedades del árido reciclado en el hormigón endurecido,” p. 95, 2008.
- [4] M. Gesoglu, E. Güneyisi, H. Ö. Öz, M. T. Yasemin, and I. Taha, “Durability and Shrinkage Characteristics of Self-Compacting Concretes Containing Recycled Coarse and/or Fine Aggregates,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2015, pp. 1–18, 2015.
- [5] M. Etxeberria, E. Vázquez, a. Marí, and M. Barra, “Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 5, pp. 735–742, May 2007.
- [6] M. Sánchez de Juan, “Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural,” *Ing. Civ. Construcción / E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos*, vol. Tese de Do, p. 502, 2004.
- [7] M. S. de Juan and P. A. Gutiérrez, “Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 872–877, 2009.
- [8] editor Hasen TC, “Recycling of demolished concrete and masonry,” *RILEM (International Union Test. Res. Lab. Mater. Struct.)*, 1992.
- [9] T. C. Ravindrarajah RS, “Properties of concrete made with crushed concrete as coarse

aggregate," *Mag Concr. Res* 1985; 37(130)29–38. March.

- [10] M. B. de Oliveira, "Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado," 1996.
- [11] B. M. Vazquez E, "Hormigón con áridos reciclados."
- [12] K. Rahal, "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate," *Build. Environ.*, vol. 42, n, 2007.
- [13] L. Butler, J. S. West, and S. L. Tighe, "The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 10, pp. 1037–1049, Oct. 2011.
- [14] Z. Shui, D. Xuan, H. Wan, and B. Cao, "Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 8, pp. 1723–1729, 2008.
- [15] L. Evangelista, M. Guedes, J. De Brito, A. C. Ferro, and M. F. Pereira, "Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste," *Constr. Build. Mater.*, vol. 86, pp. 178–188, 2015.
- [16] P. Saiz Martínez, M. González Cortina, F. Fernández Martínez, and A. Rodríguez Sánchez, "Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication," *J. Clean. Prod.*, vol. 118, pp. 162–169, 2016.
- [17] E. F. Invertimos, "Actividad 2 : Transferencia Tecnológica relativa a materiales de construcción , incluyendo materiales marginales y residuos aprovechables terraplenes en el Sur de España y Norte de Marruecos , y metodologías para su," 2013.
- [18] SHTG, "Máquina de ensayo de abrasión,Set de pruebas triaxial completamente automático,Compactador Proctor estándar." [Online]. Available: <http://www.testerinchina.es/5-3-abrasion-testing-machine.html>.
- [19] Teoriadeconstruccion.net, "Morteros (tipos) - teoria de construccion." [Online]. Available: <http://teoriadeconstruccion.net/blog/morteros-tipos/>.
- [20] T. Le, S. Rémond, G. Le Saout, and E. Garcia-Diaz, "Fresh behavior of mortar based on recycled sand - Influence of moisture condition," *Constr. Build. Mater.*, vol. 106, no. March, pp. 35–42, 2016.
- [21] C. Neno, J. de Brito, and R. Veiga, "Using fine recycled concrete aggregate for mortar production," *Mater. Res.*, vol. 17, no. 1, pp. 168–177, 2014.
- [22] R. V. Silva, J. De Brito, and R. K. Dhir, "Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 105, no. September, pp. 400–415, 2016.
- [23] R. V. Silva, J. De Brito, and R. K. Dhir, "Performance enhancement of recycled concrete aggregate e A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 105, pp. 400–415, 2016.
- [24] I. Vegas, I. Azkarate, a Juarrero, and M. Frías, "Diseño y prestaciones de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados prodedentes de escombros de hormigón.," *Des. Perform. Mason. mortars made with Recycl. Concr. aggregates.*, vol. 59, no. 295,

pp. 5–18, 2009.

- [25] R. Oliveira, J. de Brito, and R. Veiga, "Reduction of the cement content in rendering mortars with fine glass aggregates," *J. Clean. Prod.*, vol. 95, pp. 75–88, 2015.
- [26] L. Hanzic, A. Mautinger, B. Juric, and L. A. Pereira de Oliveira, "Water retention capability of mortars made of recycled aggregate," *Proc. Conf. Sustain. Build. SB08 Melbourne. Vol. 2*, vol. Volume 1, no. September 2008, pp. 615–621, 2008.
- [27] J.-K. Hwang, E.-H. , Ko, Y.S., Jeon, "Effect of polymer cement modifiers on mechanical and physical properties of polymer-modified mortar using recycled waste concrete fine aggregate," *Department of Chemical Engineering, Kongju National University, Chungnam-do 330-717, South Korea*, 2007. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-34547645290&origin=inward&txGid=0>.
- [28] J. R. Jiménez, J. Ayuso, M. López, J. M. Fernández, and J. de Brito, "Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing," *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 679–690, 2013.
- [29] Z. Zhao, S. Remond, D. Damidot, and W. Xu, "Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 81, pp. 179–186, 2015.
- [30] F. A. Kou, Shi Cong, Chi-Sun Poon, "Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures," *Cem. Concr. Compos.*, pp. 788–795, 2011.
- [31] O. Çakir, "Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RCA) concrete with mineral additives," *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, pp. 17–25, 2014.
- [32] B. González-Fonteboa and F. Martínez-Abella, "Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties," *Build. Environ.*, vol. 43, no. 4, pp. 429–437, Apr. 2008.
- [33] D. R. G. Mitchell, I. Hinczak, and R. A. Day, "Interaction of silica fume with calcium hydroxide solutions and hydrated cement pastes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 28, no. 11, pp. 1571–1584, Nov. 1998.
- [34] C. Shi, S. Liu, Z. Cao, X. An, and F. He, "Quantitative determination of fly ash in fresh cement mortars and concretes," *J. Sustain. Cem. Mater.*, vol. 2, no. 1, pp. 58–66, Mar. 2013.
- [35] E. Güneyisi, M. Gesoğlu, Z. Algin, and H. Yazıcı, "Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 64, pp. 172–183, 2014.
- [36] J. L. Thompson, M. R. Silsbee, P. M. Gill, and B. E. Scheetz, "Characterization of silicate sealers on concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 27, no. 10, pp. 1561–1567, 1997.
- [37] H. Gao, , G. Wu, and X. Yuan, "Experimental Research on Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete," *3rd Int. Conf. Mater.*, no. Ic3me, pp. 2–5, 2011.
- [38] S. Kazemian, A. Prasad, B. B. K. Huat, T. A. Mohammed, and F. N. A. A. Aziz, "Effect of cement, sodium silicate, kaolinite and water on the viscosity of the grout," *Sci. Res.*

Essays, vol. 5, no. 22, pp. 3434–3442, 2010.

- [39] M. Thomas, "Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete," *Portl. Cem. Assoc.*, p. 24, 2007.
- [40] D. Burgos, "Durability of blended mortars using fly ash of high unburned carbon content," no. January, 2012.
- [41] D. M. Burgos, D. E. Angulo, and R. M. de Gutiérrez, "Durabilidad de morteros adicionales con cenizas volantes de alto contenido de carbón," *Rev. Lat. Met. Mat*, vol. 35, no. 2, pp. 173–188, 2015.
- [42] H.-S. Shi, B.-W. Xu, T. Shi, and X.-C. Zhou, "Mater. Struct.," vol. 41, pp. 1051–1056, 2008.
- [43] Agencia ID/DICYT, "Cemento y concreto más resistentes a partir de cenizas volantes de carboeléctricas," *Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (Cideteq)*. [Online]. Available: <http://www.dicyt.com/noticias/cemento-y-concreto-mas-resistentes-a-partir-de-cenizas-volantes-de-carboelectricas>.
- [44] F. Amahjour, P. Pardo, and M. V Borrachero, "Propiedades De Lechadas De Cemento Fabricadas Con Cementos De Tipo I Y Mezclas Con Cenizas Volantes (Cv)Y Humo De Sílice (Hs)," *VIII Congr. Nac. Propiedades Mec. Solidos*, no. Cv, pp. 729–737, 2002.
- [45] HEADWATER RESUORCES, "Fly Ash: The Modern Pozzolan Improving Concrete Performance Enhancing Our Environment"," *Dispon. a través www.flyash.com, South Jordan (Utah, EE.UU.)*, 2009.
- [46] R. Mejía and P. Rodríguez, "Durabilidad y corrosión en materiales cementicios: fundamentos, componentes, fenomenos de deterioro, mecanismos de transporte, metodos de control, prevención y evaluacion de la corrosión," *CYTED*, 1999.
- [47] S. C. Kou, C. S. Poon, and D. Chan, "Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete," *Mater. Struct.*, vol. 41, no. 7, pp. 1191–1201, 2008.
- [48] D. C. Shi C. Kou, Chi S. Poon, "Properties of Steam Cured Recycled Aggregate Fly Ash Concrete," *Int. RILEM Conf. Use Recycl. Mater. Build. Struct.*, no. January, pp. 590–599, 2004.
- [49] P. Gonçalves and J. d. Brito, "Recycled aggregate concrete (RAC) – comparative analysis of existing specifications," *Mag. Concr. Res.*, vol. 62, no. 5, pp. 339–346, May 2010.
- [50] A. Systems, "É C N I C A D I INFORMACIÓN MEYCO MS 685 Adición líquida de nanosílice para hormigón."
- [51] S. S. Plumed, "Análisis del comportamiento del mortero fabricado con árido reciclado," Universidad Politecnica de Cataluña, 2016.
- [52] UNE-EN 1015-3 2000, "Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)."
- [53] UNE-EN 1015-6: 1999, "Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco."
- [54] UNE-EN 1015-11 2000, "Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido."

- [55] UNE-EN 1015:1999, "Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido."
- [56] E. Pigueiras, H. Cárdenas, and E. Díaz, "Evaluación de Morteros Estructurales Elaborados con Áridos Reciclados," *Renia*, vol. 4, no. 1–2, pp. 6–9, 2013.
- [57] V. Spaeth and A. Djerbi Tegguer, "Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments," *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 2, no. 2, pp. 143–152, 2013.
- [58] L. Senff, J. A. Labrincha, V. M. Ferreira, D. Hotza, and W. L. Repette, "Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 7, pp. 2487–2491, 2009.
- [59] K. Sobolev, I. Flores, L. M. Torres-Martinez, P. L. Valdez, E. Zarazua, and E. L. Cuellar, "Engineering of SiO₂ nanoparticles for optimal performance in nano cement-based materials," *Nanotechnol. Constr.* 3, pp. 139–148, 2009.
- [60] M. Aly, M. S. J. Hashmi, A. G. Olabi, M. Messeiry, E. F. Abadir, and A. I. Hussain, "Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and physical behaviour of waste-glass cement mortar," *Mater. Des.*, vol. 33, no. 1, pp. 127–135, 2012.
- [61] M. G. Beltrán, A. Barbudo, F. Agrela, J. R. Jiménez, and J. de Brito, "Mechanical performance of bedding mortars made with olive biomass bottom ash," *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, pp. 699–707, 2016.